UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle
Présenté par :

KOUACHE Ahmed Zouhir **REHOUMA Lakhdar**

Thème:

Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques

Soumis au jury composée de :

Mr IDER Zahir	MAA	Président	UKM Ouargla
Mr DJAFOUR Ahmed	Professeur	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
Mr DANOUNE Mohammed Bilal	Doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla
Mr BENAOUADJ Mahdi	MCB	Examinateur	UKM Ouargla

Année universitaire 2019/2020

DÉDICACES

A mon Très Cher père Abdelkader et ma très Chère Mère Hadda pour leur sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourage que Dieu me les garde

A Mes très chères sœurs (Leila, Khadidja, F.Zohra, Khaoula, Aya)

A très Chères oiseaux (Kosay etTasnim)

A mon Très cher oncle Farhat

A Ma chères familles Bouzid et Kouache

A Mon cher binôme Lakhdar Rehouma

Pour nos très chers amis et camarades

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtouts nos enseignants du département génie électrique Ouargla.

A.ZOUHIR

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut… Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, Le respect, la reconnaissance… Aussi, c'est tout simplement que Je dédie cette mémoire

A ma très chéré mère : S. Safia

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes cotés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et mon profond estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

A l'âme de mon cher père R.Med dans sa tombe, et je demande à Dieu de mettre cette œuvre dans la balance de ses bonnes actions

À mes chers frères et sœurs(ali,mahmoud,ahmed,djemal,fatima et hanane)

À toute ma famille

Aux mes professeurs encadrants M.bilal et A.Djaafour

A'Mon cher binôme dans cette mémoire A.Zouhir

Pour nos très chers amis et camarades

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtouts nos enseignants de département génie électrique Ouargla.

R.Lakhdar

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire

ET avant tout nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage

Durant Ces langues années d'étude.

Nous tenons à remercier vivement **PROF.DJAFOUR AHMED**, notre Rapporteur, qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Et Nous voudrions remercier spécialement **M^R^DANOUNE MOHAMMED BILAL**, chercheur à l'université d'Ouargla, Co-encadreur de cette mémoire, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.

Nous tenons également à remercier **M^R^IDERZAHIR** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de cette mémoire.

Nos vifs remerciements aussi à **DR.BENAOUADJ MAHDI** pour avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Nous volons exprimer nos remerciements à **M^R^GOUGUIABDELMOUMEN**, **MR REHOUMA YOUSSEF** chercheurs à l'université d'Ouargla pour ses conseils et son aides.

Et tous les enseignantsde département de Génie électrique.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis,

Qui nous ont toujours soutenue et encouragée

Au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous.

LISTE DES ACRONYMES

LES ACRONYMES	LES DEFINITIONS
PAC	Pile A Combustible
PEM	Proton Exchange Membrane (Membrane d'échange de protons)
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Pile à Combustible à Membrane d'Echange de Protons)
ANN	Artificial Neural Network (Réseau Neuronal Artificiel)
GA	Genetic Algorithm (Algorithme Génétique)
PSO	Particle Swarm Optimization (Optimisation par Essaim de Particules)
ED	Evolution Différentiel
GE	General Electrique
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique)
PTFE	Poly-Tétra-Fluoro-Ethylène hydrophobe
GDL	Gas Diffusion Layer (Couche de Diffusion de Gaz)
Ppm	La Partie par million
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell (Pile à Combustible au Méthanol Direct)
DEFC	Direct Ethanol Fuel Cell (Pile à Combustible à l'Ethanol Direct)
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell (Pile à combustible à acide phosphorique)
CSi	Carbure de Silicium
AFC	Alkaline Fuel Cell (Pile à combustible alcaline)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Pile à combustible au carbonate fondu)

MERDC	Mobility Equipment Research and Development Center (Centre de Recherche et Développement d'Equipements de Mobilité)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Pile à combustible à oxyde solide)
YSZ	Zirconium oxide Stabilize by Yttrium (Oxyde de Zirconium Stabiliser par Yttrium)
LSM	Lanthanum-Strontium-Magnesium (Lanthane-Strontium-Magnésium)
LED	Light-Emitting Diode (Diode Electro-Luminescente)
GPS	Global Positioning System (Système de Positionnement Global)
ABC	Artificial Bee colonyAlgorithm (Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles)
FO	Objective Function (Fonction Objectif)
G-R-G	Generalised Reduced Gradient (Dégradé Réduit Généralisé)
RMSE [v]	Root Mean Square Error (Erreur Quadratique Moyenne)
MAE [v]	Mean Absolute Error (Erreur Absolue Moyenne)
SSE [v]	Sum Square Error (Erreur Carré de Somme)

LISTE DES SYMBOLES

Symboles	Définitions	Unités
O_2	Oxygène	[-]
H^+	Protons	[-]
e^-	Électron	[-]
H_2O	L'eau	[-]
H_2	Hydrogène	[-]
SO_3	Groupes sulfoniques	[-]
CO_2	Le dioxyde de carbone	[-]
CO	Le monoxyde de carbone	[-]
CH_3OH	Le méthanol	[-]
C_2H_5OH	L'éthanol	[-]
K_2CO_3	Le carbonate	[-]
KOH	L'hydroxyde de potassium	[-]
OH^-	Ion hydroxyde	[-]
Ni	Le nickel	[-]
Ag	Argent	[-]
Li_2CO_3	Le carbonate de lithium	[-]
$(CO_3)^{-2}$	Les ions carbonates	[-]
ZrO_2	D'oxyde de zirconium	[-]
Y_2O_3	L'yttrium	[-]
CH_4	Méthane	[-]
LiAlO2	Oxyde d'aluminium et de lithium	[-]
V_{PAC}	La tension aux bornes de la pile à combustible	[V]
E_{nernst}	La tension théorique	[V]
R_{act}	La résistance d'activation	[Ω]
R_{con}	La résistance de concentration	[Ω]
V_{act}	La surtension d'activation.	[V]
V_{ohm}	La surtension ohmique	[V]
V_{conc}	La surtension de concentration	[V]
ΔG	Le changement d'énergie libre	[J/k. mol]
ΔS	Le changement d'entropie	[J/k. mol]

F	La constante de faraday	[C/k. mol]
T	La température de fonctionnement de la pile.	[k]
$\mathbf{T_{ref}}$	La température de référence	[k]
R	La constante universelle du gaz	[J/k. mol]
$\mathbf{P^*_{H_2}}$	La pression partielle à l'interface d'hydrogène.	[atm]
$\mathbf{P^*_{O_2}}$	La pression partielle à l'interface d'oxygène.	[atm]
$\mathbf{RH_a}$	L'humidité relative à l'anode.	[%]
$\mathbf{RH_c}$	L'humidité relative à la cathode.	[%]
$\mathbf{P_{anode}}$	La pression de l'hydrogène à l'anode.	[atm]
$\mathbf{P_{cathode}}$	La pression de l'oxygène à la cathode.	[atm]
$\mathbf{P^{sat}_{H_2O}}$	La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié.	[atm]
$\boldsymbol{\xi_1,\xi_2,\xi_3,\xi_4}$	Coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC.	[-]
$\mathbf{I_{PAC}}$	.Le courant de fonctionnement de la pile.	[A]
$\mathbf{CO^*_2}$	La concentration d'oxygène à la surface de la catalyseur.	[mol/cm^3]
$\mathbf{R_C}$	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.	[Ω]
$\mathbf{R_m}$	La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons.	[Ω]
l	L'épaisseur de la membrane.	[µm]
A	La surface active de la pile.	[cm^2]
$\boldsymbol{\rho_M}$	La résistivité spécifique de la membrane	[Ω. cm]
$\boldsymbol{\lambda_{H_2O/SO_3^-}}$	La teneur en eau dans la membrane	[-]
J	La densité de courant	[A/cm^2]
$\mathbf{J_{max}}$	La densité de courant maximale.	[A/cm^2]
b	La constante électrochimie.	[V]
$\mathbf{Q_{H_2}}$	Le débit d'hydrogène.	[ml/min]
N	Le nombre de couches (couples anode/cathode).	[-]
$\mathbf{V_m}$	Le volume molaire de H2.	[l/mol]
Z	Le nombre d'électrons impliqués dans la réaction d'une molécule de dihydrogène.	[-]
F	Constante de Faraday.	[A.S/mol]
$\mathbf{P_{PAC}}$	La puissance produite.	[W]

P_{abs}	La puissance absorbée.	[W]
PCI	Le pouvoir calorifique inférieur.	[KJ/Nm^3]
G_{best}, **Xbest**	Position globale.	[-]
P_{best}	Meilleur position.	[-]
$X_i(t+1)$	Nouvelle position des particules	[-]
$X_i(t)$	Position actuelle des particules	[-]
$V_i(t)$	Vitesse actuelle des particules.	[-]
$V_i(t+1)$	Nouvelle valeur de vitesse des particules	[-]
ω	Le moment d'inertie.	[-]
r1, r2	Nombres aléatoire dans [0,1].	[-]
C1, C2	Coefficients constances.	[-]
NP	Nombre totale des particules	[-]
X_{LB}	Valeur inférieures de problème	[-]
rand (0,1)	Nombre numérique dans l'intervalle [0,1].	[-]
X_{UB}	Valeur supérieure de problème.	[-]
Xi	Le cible ou par vois le vecteur parent.	[-]
Vi	Vecteur donneur.	[-]
F	Facteur de la mutation.	[-]
X_{rand1}, X_{rand2} et X_{rand3}	Une valeur aléatoire choisie au sein de la population	[-]
CR	Taux de croisement.	[-]
t_{rand}	Nombre d'itération sélectionné aléatoirement	[-]
$V_{exp}(i)$	Vecteur de tension de la pile à combustible expérimentale	[V]
$V_{est}(i)$	Vecteur de tension de la pile à combustible estimé	[V]

Sommaire

Dédicace

Remercîment

Liste des Acronymes

Liste des Symboles

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction générale……1

CHAPITRE I : Généralités sur les piles à combustible et leurs applications

I.1 Introduction……4

I.2 Historique générale de la pile à combustible 4

I.3 Structure d'un module (stack) 5

I.4 Le mécanisme de fonctionnement d'une pile à combustible 5

I.5 Les différents types des piles à combustible 7

I.5.1 Pile à combustible à membrane polymère PEMFC 7

I.5.1.1 Historique 7

I.5.1.2 Structure d'une cellule élémentaire de PEMFC 7

I.5.1.3 Principe de fonctionnement PEMFC.....9

I.5.1.4 Avantages et inconvénients 10

I.5.2 Pile à combustible à méthanol direct DMFC 10

I.5.2.1 Historique 10

I.5.2.2 Structure de DMFC 10

I.5.2.3 Principe de fonctionnement.....11

I.5.2.4 Avantages et inconvénients 12

I.5.3 Pile à combustible à l'éthanol direct DEFC 12

I.5.4 Pile à combustible à acide phosphorique PAFC 13

I.5.4.1 Historique 13

I.5.4.2 Structure de PAFC 14

I.5.4.3 Principe de fonctionnement 14
I.5.4.4 Avantages et inconvénients 15
I.5.5 Pile à combustible à alcaline AFC 15
I.5.5.1 Historique 15
I.5.5.2 Structure 16
I.5.5.3 Principe de fonctionnement 17
I.5.5.4 Réactions 17
I.5.5.5 Avantages et inconvénients 18
I.5.6 Pile à combustible à carbonate fondu MCFC 18
I.5.6.1 Historique 18
I.5.6.2 Structure d'une cellule élémentaire 19
I.5.6.3 Principe de fonctionnement 19
I.5.6.4 Réactions 19
I.5.6.5 Avantages et inconvénients 20
I.5.7 Pile à combustible à oxyde solide SOFC 20
I.5.7.1 Historique 21
I.5.7.2 Structure 21
I.5.7.3 Principe de fonctionnement 22
I.5.7.4 Réactions 22
I.5.7.5 Avantages et inconvénients 23
I.6 Caractéristiques et performances 23
I.7 Applications des piles à combustible 24
I.7.1 Transports 24
I.7.2 Applications stationnaires 25
I.7.3 Applications portables 25
I.7.4 Applications dans l'industrie électronique 26
I.7.5 Application pédagogiques ou pour formation 26
I.7.6 Application militaires 27

I.7.7 Alimentation auxiliaire ou secours.....28

I.8 Conclusion.....29

CHAPITRE II : Modélisation et caractérisation de la pile à combustible de type PEM

II.1 Introduction.....30

II.2 Décomposition interne de la pile PEM.....30

II.2.1 Les électrodes.....31

II.2.2 La membrane.....32

II.2.3 L'assemblage des piles en séries.....32

II.2.4 Les auxiliaires de pile PEM.....34

II.2.4.1 Bouteille métal hydrure.....34

II.2.4.2 Détendeur et manomètres.....35

II.2.4.3 Ventilateur de refroidissement et alimentation d'oxygène.....35

II.2.4.4 Les convertisseurs de contrôle de tension:.....36

II.3 Modélisation mathématique de la pile.....36

II.3.1 Modèle d'Amphlett.....37

II.3.1.1 La Tension de Nernst.....39

II.3.1.2 La surtension d'activation.....40

II.3.1.3 La surtension ohmique.....40

II.3.1.4 La surtension de concentration.....41

II.4 Caractérisation de la pile PEMFC.....42

II.4.1 Caractéristique V-I de la PEMFC.....42

II.4.2 Caractéristique P-I de la PEMFC.....43

II.4.3 L'influence de la température sur les caractéristiques électriques de la PEM.....44

II.4.4 L'influence de la pression sur les caractéristiques électriques de la PEM.....45

II.4.5 La consommation d'hydrogène par la pile.....46

II.4.6 Le rendement de la pile à combustible.....47

II.5 Conclusion.....48

CHAPITRE III : Identification des paramètres de la pile PEM par les méthodes méta-heuristiques

III.1 Introduction 49

III.2 Les méthodes d'optimisation méta heuristiques.....50

III.2.1 Principes de fonctionnement des méthodes méta-heuristiques sélectionnés.....50

III.2.1.1 Optimisation par essaims particulaires (PSO).....51

III.2.1.2 Evolution Différentiel (ED).....52

III.3 Application de méthodes méta-heuristiques sur d'identification des paramètres de modèle de PAC.....55

III.3.1 La fonction objectif (FO).....55

III.3.2 Essais expérimentals.....56

III.3.2.1 Plateforme de la caractérisation expérimental.....56

III.4 Résultats et discussion.....58

III.4.1 Caractérisation V-I 58

III.4.2 Convergences des méthodes PSO et ED 59

III.5 Conclusion.....60

Conclusion générale.....62

Références Bibliographiques

Annexes

LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES DES FIGURES	PAGES
	CHAPITRE I	
Figure I.1	Les essais de Christian Schönbein et de William Robert Grove.	4
Figure I.2	Exemple de stack chez ZSW (23 cellules).	5
Figure I.3	Oxydation de l'hydrogène à l'anode.	6
Figure I.4	Réduction de l'oxygène à la cathode.	6
Figure I.5	Schéma globale de principe.	6
Figure I.6	Catalyseur du coté anode.	8
Figure I.7	Couche de diffusion de gaz.	8
Figure I.8	Schéma de principe d'une cellule élémentaire du PEMFC.	9
Figure I.9	Schéma de principe d'une cellule élémentaire du DMFC.	11
Figure I.10	Schéma de principe d'une cellule élémentaire du DEFC.	13
Figure I.11	Schéma de principe d'une cellule élémentaire du PAFC.	14
Figure I.12	Pile combustible de type AFC.	16
Figure I.13	Pile à combustible de type MCFC.	18
Figure I.14	Pile à combustible de type SOFC.	20
Figure I.15	Quelques exemples d'applications des PAC dans les domaines transports.	24
Figure I.16	Unité de 1 MW de type PEMFC de la société canadienne.	25

Figure I.17	Pile à combustible avec réservoir de méthanol.	26
Figure I.18	Quelque exemple des PAC à faible puissance.	26
Figure I.19	Voiture à hydrogène à pile réversible.	27
Figure I.20	Pile à combustible portable JENNY SFC SMART FUEL CELL.	27
Figure I.21	Pile à combustible efoy, fiche pratique camping-car.	28
	.	

CHAPITRE II

Figure II.1	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC.	30
Figure II.2	Représentation schématique de la zone de triple contact.	31
Figure II.3	Nouvelles membranes conductrices de protons (biomimétiques)	32
Figure II.4	Assemblage membrane-électrodes de sept couches.	33
Figure II.5	Plaques bipolaire de pile PEM	33
Figure II.6	Structure d'un module à trois cellules	34
Figure II.7	Bouteille métal hydrure.	34
Figure II.8	Détendeur et manomètres.	35
Figure II.9	Vanne de purge.	36
Figure II.10	Convertisseur DC/DC.	36
Figure II.11	Courbe de polarisation typique d'une PAC.	38
Figure II.12	Schéma électrique équivalant d'une PAC.	38

Figure II.13	Caractéristique V = f(I) de la PEMFC.	42
Figure II.14	Caractéristique P = f(I) de la PEMFC.	43
Figure II.15	L'influence de la température sur les caractéristiques V-I.	44
Figure II.16	Zoome de la figure (II.15).	44
Figure II.17	L'influence de la température sur les caractéristiques P-I.	44
Figure II.18	Zoome de la figure (II.17).	44
Figure II.19	L'influence de la pression sur les caractéristiques V-I.	45
Figure II.20	Zoome de la figure (II.19).	45
Figure II.21	L'influence de la pression sur les caractéristiques P-I.	46
Figure II.22	Zoome de la figure (II.21).	46
Figure II.23	Caractéristique de consommation d'hydrogène par la PEMFC.	47

CHAPITRE III

Figure III.1	Mouvement de particules.	54
Figure III.2	Maquette d'expérimentations.	56
Figure III.3	La courbe V-I de PAC.	58
Figure III.4	Zoome de la partie sélectionnée.	58

Figure III.5	Courbes de la convergence.	60
Figure III.6	Zoome des courbes de la convergence.	60

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	TITRE	PAGE
	CHAPITRE I	
Tableau I.1	Avantages et inconvénients du PEMFC.	10
Tableau I.2	Avantages et inconvénients du DMFC.	12
Tableau I.3	Avantages et inconvénients du PAFC.	15
Tableau I.4	Avantages et inconvénients du AFC.	18
Tableau I.5	Avantages et inconvénients du MCFC.	20
Tableau I.6	Avantages et inconvénients du SOFC.	23
Tableau I.7	Caractéristiques principales des différentes PAC.	24
Tableau I.8	Domaine potentiel d'utilisation.	28
	CHAPITRE III	

Tableau III.1	Les limites supérieures et inférieures des paramètres.	55
Tableau III.2	Caractéristiques électriques des piles à combustible modèle de «Heliocentris».	57
Tableau III.3	Les paramètres optimaux du PAC helieocentris-50W.	59

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La contribution des ressources énergétiques renouvelables dans le processus de production d'électricité est devenue obligatoire. Les principaux raisons derrière sa sont : la rareté des combustibles fossiles, et l'augmentation au niveau de risques environnementales causés par la consommation énorme d'énergie fossile **[1,2]**. Il existe de nombreuses ressources renouvelables capables de fournir une énergie propre et durablement. Parmi eux, la pile à combustible (PAC) qui a attiré l'attention de beaucoup des chercheurs dans les dernières années.

La pile à combustible est un convertisseur d'énergie capable de convertir en courant électrique une quantité énergie chimique stocké. Le PAC est constitué principalement d'un électrolyte placé entre deux électrodes métalliques, appelées cathode et anode. En fonction de l'électrolyte utilisé, nombreux PACs peuvent être construites **[3,4]**.

Parmi ces types, la pile à membrane échangeuse (PEMFC) qui a été utilisé dans beaucoup d'applications industrielles telles que les véhicules électriques. En comparaison des autres piles présentés dans la littérature, la PEMFC offres beaucoup des mérites tels que : une pression de fonctionnement basse, température de fonctionnement réduit, faible humidité relative, rendement élevé, vert source, pas de contamination, démarrage au rapide et déchets moins que autres types **[3,5,6]**.

L'un des facteurs qui a encouragé les chercheurs à utiliser les piles à combustible PEM est l'existence d'un grand nombre de modèles de modélisation, qui ont permis de comprendre le comportement le comportement interne du générateur, d'estimer la puissance fournie par la source, de simuler et de tester de nouveaux algorithmes de contrôle **[7]**.

Ces modèles de modélisation peuvent être classées en deux approches principales: La première approche inclut structuraux, qui visent à simuler le transfert de chaleur, le transport de masse et les phénomènes électrochimiques produits dans les piles à combustible. Ces modèles se concentrent sur la modélisation des éléments spécifiques de comportement de la pile, telle que l'anode, la cathode et la membrane, alors que d'autres visent à présenter une simulation complète de la pile à combustible.

Tous ces modèles prévoient d'expliquer les processus fondamentaux se produisant dans les systèmes de piles à combustible et en conséquence servir d'outil pour la conception et l'optimisation des différents composants de cellules.

La deuxième approche inclut les modèles basés sur les équations empiriques ou semi empiriques, appliqués afin de prévoir l'effet de différents paramètres opératoires sur les caractéristiques courant-tension de la pile à combustible, sans examiner en détail les phénomènes physiques et électrochimiques impliqués dans l'opération. Ce modèle a été présenté par Amphlett et al **[8]**. Depuis l'année 1994. Après son développement, le modèle d'Amphlett a gagné beaucoup d'attention par les chercheurs dus à sa simplicité et efficacité.

Pour utiliser le modèle d'Amphlett, il y a un certain nombre des paramètres inconnus qui doivent être identifiés tout d'abord par le chercheur. Cependant, la procédure d'identification des paramètres inconnus de modèle d'Amphlett est une étape difficile en effet dus à la non-linéarité de modèle, et l'incorporation de nombres élevés des paramètres.

Pour adresser ce problème, nombreux méthodes d'optimisation basées sur l'heuristique ont été utilisées pour extraire les paramètres avec une bonne précision, et assure un bonne accordance entre les grandeurs da sorties expérimentales et estimés.

L'une des méthodes d'optimisation heuristiques bien connues est l'algorithme génétique (GA). Le simple GA a utilisé pour définir les paramètres PEMFC **[9]**. Un L'ARN-GA adaptatif a été utilisé pour évaluer le PEMFC performances tout en améliorant les caractéristiques de convergence et en réduisant l'erreur de tension absolue **[10]**. L'autour en **[11,12]** a proposé la méthode réseau de neurones artificiels (ANN) pour modéliser et découvrir les phénomènes internes un seul PEMFC. L'algorithme d'optimisation évolution différentielle (DE) a été également appliquée dans ce contexte **[13]**.

Malgré que la PEMFC a été modélisé et représenté par différentes algorithmes d'optimisation méta-heuristiques, les résultats obtenus ont besoin plus d'amélioration, en termes de précision et rapidité de la méthode. Pour achever ce but, une méthode d'optimisation simple et efficace, appelé optimisation par essaimes des particules (PSO) a été proposée dans cette étude pour identifier les paramètres de la pile à combustible.

Le but principal est de développé un modèle mathématique de pile à combustible fiable et plus précise, capable de modéliser le comportement réel de la pile. L'idée est de minimiser l'erreur entre les points tension-courant expérimentaux et estimés, et assurer un bon accordance.

De plus, Pour faire une étude significative, les résultats de PSO ont été comparées avec les résultats obtient par la méthode d'évolution différentielle. Dans même contexte, une pile PEM de puissance nominale 50W a été utilisée pour démontrer l'efficacité de la méthode proposée. Les résultats finaux obtenus sont très encourageantes, un très bon accordance entre la

courbe de polarisation expérimentale et estimé a été extrait. Le reste de mémoire est organisé comme suite : dans le premier chapitre, nous ferons référence au côté théorique, qui est une introduction et une définition des piles à combustible, et nous essaierons de mentionner leurs types, leurs : caractéristiques, histoires, principes de fonctionnements, Avantages et inconvénients, performances et applications.

Ensuite dans le deuxième chapitre, nous passerons du général au spécifique, où nous étudierons le modèle mathématique d'une pile à combustible PEM et ses caractéristiques issues de l'étude expérimental (caractéristique IV, IP ...) à l'aide d'une maquette mobile conçu pour produire de l'énergie électrique.

Enfin dans le troisième chapitre (Identification de paramètres de PAC par les méthodes méta-heuristiques) nous appliquerons deux algorithmes d'optimisation (appelées PSO et DE) basés sur l'intelligence artificiel, ont été appliqués pour extraire les paramètres optimale de modèle de générateur et atteindre l'erreur minimale et clarifier l'accord entre les valeurs mesurées et simulées.

CHAPITRE I

Généralités sur les piles à combustibles et leurs applications

I.1 Introduction

A cause de développement technologique ainsi que industriel, la demande sur l'énergie électrique a augmenté de manière rapide **[2]**. Les scientifiques ont commencés à chercher de nouvelles méthodes de production d'énergie électrique. L'un de ces sources est la pile à combustible. Ces dernières sont des moyens électrochimiques utilisées pour convertir l'énergie chimique stockée en énergie électrique **[14]**.

Dans l'industrie il existe plusieurs types des piles à combustibles, développées par des expertes. Chaque une a ses avantages et ses inconvénients, mais elles restantes toujours un moyen de production d'énergie qui peuvent être exploité dans différent applications. Ce chapitre présente les piles à combustibles les plus communément utilisées dans l'industrie. Le principe de fonctionnement des PACs, leurs avantages, inconvénient, et leurs applications ont été illustrés on détaille.

I.2 Historique générale de la pile à combustible

La découverte de la pile à combustible est attribuée au Suisse Christian Schönbein (1799-1868) en 1838 **[14]**. Après avoir effectué une électrolyse dans un tube en U avec deux électrodes en platine, il a arrêté le transit du courant et remarqué qu'un courant électrique propager dans le sens inverse.

En janvier 1839, un Anglais, William Robert Grove (1811-1896), (connu comme le Père de la pile à combustible) **[15]**, a amélioré la pile électrique et s'est intéressé aussi à l'électrolyse. Il a développé la notion que si l'on peut séparer l'eau de ses constituants grâce à l'électricité, alors que nous pouvons faire le processus inverse. En février 1839, dans un article publié dans le magazine, il a mentionné la possibilité de produire un courant électrique en faisant réagir de l'hydrogène et de l'oxygène. Il a présenté plus tard (1843-1845) la première pile à combustible. Appelé son générateur «gaz battery» **[16,17]**.

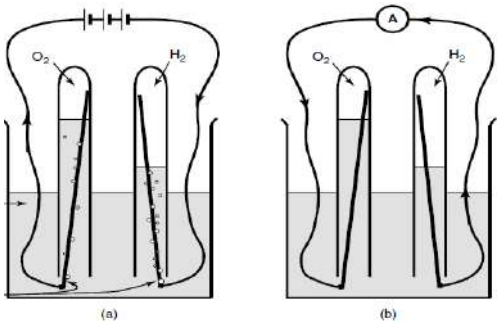


Figure I.1 : Les essais de Christian Schönbein et de William Robert Grove **[18]**.

Bien que la pile à combustible ait été découverte en 1839, il est resté jusqu'en 1930 pour entrer dans le développement et l'utilisation **[19]**.

I.3 Structure d'un module (stack)

Les piles à combustibles sont des cellules électrochimiques constituées d'un électrolyte (solide ou liquide) pris en sandwich entre deux électrodes (anode et cathode), permettant just le passage d'ions pas d'électronset les gaz. L'anode est alimentée par un combustible et la cathode alimentée par un comburant **[20]**. Lorsque l'atome d'hydrogène atteint la surface de l'anode, elle se divise en deux composants i.e. protone et électrone. Les électrons dans ce cas sont obligés de traverser le circuit extérieur afin de firmé le cycle de conversion. La tension fourni par une cellule élémentaire d'une PAC elle très basse, généralement inférieure à 1 V.

Pour avoir une puissance suffisant, il est indispensable d'associer plusieurs cellules élémentaires en série pour former un assemblage appelé stack **[21]**. Les éléments de la connexion entre ces cellules dites les plaques bipolaires, car elles relient le pole positif d'une cellule au pôle négatif du second (en série). En plus de cette fonction électrique, qui est la collecte de courant produit par chacune des cellules élémentaires vers des électrodes de sortie, les plaques bipolaires assurent également la circulation des divers fluides, le refroidissement ou le chauffage et l'assemblage **[16,17]**.

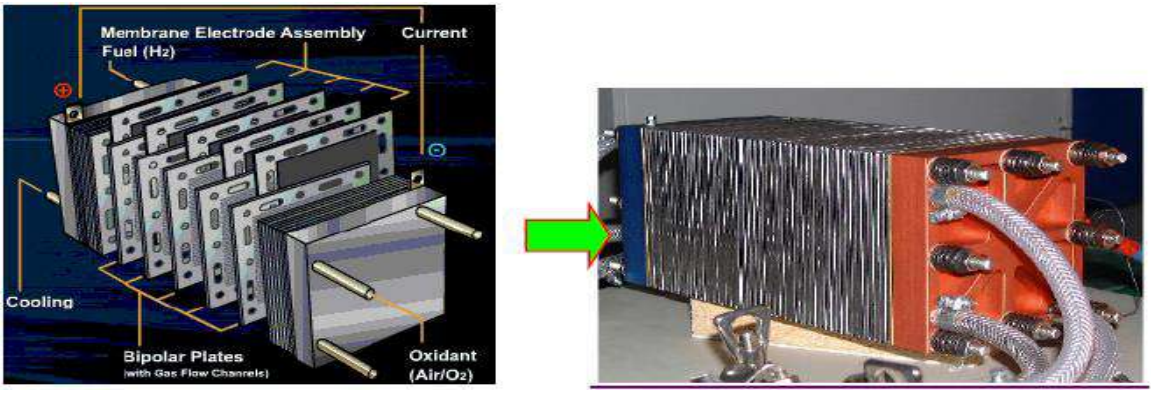


Figure I.2 : Exemple de stack chez ZSW (23 cellules) **[22]**.

I.4 Le mécanisme de fonctionnement d'une pile à combustible

Pour produire de l'électricité à partir de la pile à combustible, en fournissant continuellement de l'oxygène et de l'hydrogène à la cellule ou l'hydrogène est stocké sous pression dans des tubes et alimenté en oxygène de l'air. Pour pouvoir mieux comprendre le prencipe de fonctionnement, les deux demi-réactions sont traitées séparément comme suite :

- Dans le poteau négatif (l'anode), se produit une oxydation d'hydrogène et le résultat est une libération des protons qui pénètrent l'électrolyte lié vers la cathode et les électrons qui vont circuler dans l'électrode vers le crcuit extéricure (la charge) selon la demi-réaction de l'oxidation suivant :

$$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^- \qquad (I.1)$$

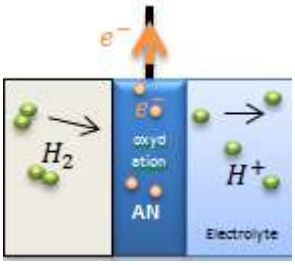


Figure I.3 : Oxydation de l'hydrogène à l'anode.

- Les électrons traversent le circuit extérieur dirigé vers la cathode (l'électrode négative) et interagissent à la triple surface électrolyte / électrode / gaz avec l'oxygène et les ionsqui a traversé l'électrolyte selon la demi-réaction de la réduction :

$$½\,O_2 + 2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2O \qquad (I.2)$$

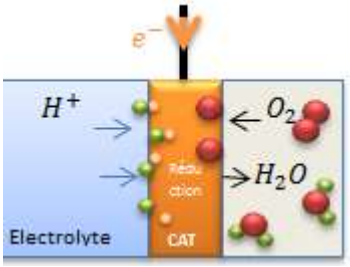


Figure I.4 : Réduction de l'oxygène à la cathode.

Donc, le schéma et le bilan global de la réaction qui se produit dans la pile à combustible est le suivant :

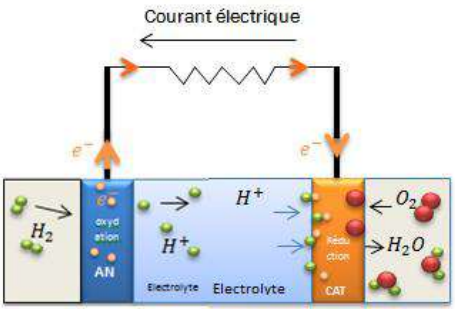


Figure I.5 : Schéma globale de principe.

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O_{\,(liquide)} + électricité + chaleur \qquad (I.3)$$

Le courant électrique produit est recueilli aux électrodes et alimente une charge et le sens de circulation de cette courant est contraire de celui des électrons **[16,17]**.

I.5 Les différents types des piles à combustible

De nombreux critères peuvent être utilisés pour la classification des différents types des PAC. Mais généralement, le type d'électrolyte utilisé est l'élément principale déicide le processus de classification.

I.5.1 Pile à combustible à membrane polymère PEMFC

I.5.1.1 Historique

L'histoire de pile à combustible type PEM a commencé à partir de 1955 quand Willard Thomas Grubb de G E décidé d'utiliser une membrane échangeuse d'ions comme électrolyte. Peu après, Leonard Niedrach a déposé du platine comme catalyseur sur un support en titane appliqué sur la membrane. En 1965, cette technologie a été utilisée pour les missions spatiales (Gemini), puis abandonnée par l'organisme gouvernemental des USA (NASA).

Dans les années 1980, une entreprise canadienne (Ballard) a réagi au développement de cette technologie **[16,17]**.

I.5.1.2 Structure d'une cellule élémentaire de PEMFC

- **Électrolyte**

L'électrolyte utilisé dans la PEMFC est une fine membrane polymère, en général, c'est le Nafion^{TM} a une base PTFE (poly-tétra-fluoro-éthylène hydrophobe) avec des groupes sulfoniques (SO_3^-) hydrophiles. Dans un milieu humide, les ions H^+fixés aux groupes SO_3^-sont mobiles et se transportent dans la membrane.

Parmi les caractéristiques principales pour cette membrane est sa conductivité ionique, qui est en termes de l'épaisseur de la membrane et le taux d'humidité (un faible taux d'humidité augmente la résistance de la membrane et un taux d'humidité trop élevé diminué cette résistance). Une autre caractéristique est la tenue en température, les membranes fonctionnement à des températures inférieur à 100 °C pour éviter la dégradation du matériau **[16,17]**.

- **Électrodes (anode/cathode)**

Les électrodes généralement sont constituées de fines particules de carbone avec une grande surface active. Les réactions électrochimiques se produit à cette surface, elle doit permettre une circulation des électrons libérés lors de la décomposition de l'hydrogène. Les électrodes sont caractérisés par : une bonne conductivité électrique, une bonne diffusion des gaz et une surface importante de contact avec électrolyte **[16,17]**.

- **Catalyseur**

On utilise le catalyseur afin faciliter, accélérer et d'augmenter l'efficacité de la réaction électrochimiques mais n'est pas consommé dans le procédé. Le catalyseur est déposé avec un liant sur la surface de chaque électrode où il est en contact de l'électrolyte, ce liant pout être hydrophobe pour faciliter l'évacuation de l'eau ou hydrophile afin d'augmenter le contact avec l'électrolyte. Pour l'anode sont utilisé un mélange platine/ruthénium et le platine seul pour la cathode **[16,17]**.

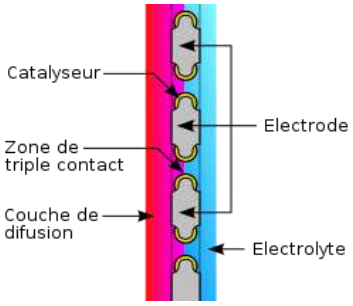


Figure I.6 : Catalyseur du coté anode **[23]**.

- **Couche de diffusion de gaz (GDL)**

Elle est construit sur du carbone soit sous forme de fibre tissée soit de non tissé pressé avec une épaisseur comprise entre 0.2 et 0.4 mm et une grand porosité **[16,17]**.

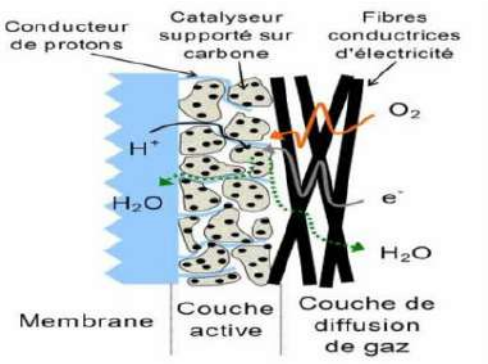


Figure I.7 : Couche de diffusion de gaz **[24]**.

Ses fonctions sont:

- Assurer la transition des gaz vers le catalyseur et l'électrolyte.
- Fournir un soutien mécanique au groupement membrane-électrode/catalyseur.
- Garantir la circulation du courant produit vers les électrodes.
- Permettre l'évacuation de l'eau formée.
- Éliminer la chaleur résultant par les réactions.

I.5.1.3 Principe de fonctionnement PEMFC

La PEMFC fonctionne généralement à une température de 60 à 80 °C. Le combustible est de l'hydrogène pur utilisé à l'anode et le comburant est de l'oxygène (ou air) à la cathode, en peut se faire par : la pression atmosphérique, compresseur, ventilateur ou gaz comprimé. Les ions qui traversé l'électrolyte sont des H^+ **[16]**. La figure suivant représente schéma de principe d'une cellule élémentaire.

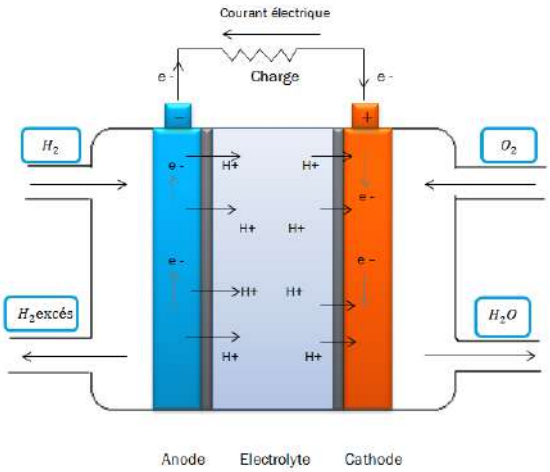


Figure I.8 : Schéma de principe d'une cellule élémentaire du PEMFC.

Le principe de fonctionnement de la pile type PEMFC repose sur l'oxydation d'un combustible (hydrogène) à l'anode (émettrice d'électrons) selon la demi-réaction :

$$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^- \qquad (I.4)$$

Et la réduction d'un comburant (oxygène) à la cathode (réceptrice d'électrons) selon la demi-réaction:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2\,e^- + 2\,H^+ \rightarrow H_2O \qquad (I.5)$$

Aboutissant à la production simultanée d'énergie électrique, d'eau et de la chaleur comme indique le bilan global de la réaction suivant :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{(liquide)} + \text{électricité} + \text{chaleur} \qquad (I.6)$$

I.5.1.4 Avantages et inconvénients

Le tableau suivant représente les principaux avantages et inconvénients du pile à combustible de type PEMFC.

Tableau I.1: Avantages et inconvénients du PEMFC **[16,17,21]**.

Avantages	Inconvénients
Fonctionnement à faible température.	La membrane et le catalyseur (platine/ruthénium) coûteux.
Petite taille.	La sensibilité au soufre et au CO (moins de 10 ppm requis).
Démarrage rapide.	Besoin de garder la membrane hydratée.
Temps de réponse très rapide.	Durée de vie et fiabilité en utilisation réelle à améliorer.
Electrolyte (membrane) solide.	
Insensible au CO_2.	

I.5.2 Pile à combustible à méthanol direct DMFC

I.5.2.1 Historique

Au milieu de 1950, le Suédois **T.O. Pavela** s'intéresse à l'usage du méthanol CH_3OH dans une pile à combustible. D'autres évolutions ont suivi au milieu des années 1960, comme ceux de l'IFP en France ou de la société Varta en Allemagne.

En 1989, les travaux du Locker Hydrocarbon ont lancé la PAC au méthanol vers la voie actuelle **[16,17]**.

I.5.2.2 Structure de DMFC

- **Électrolyte– passage de méthanol (crossover)**

L'électrolyte utilisée il est identique à celle des piles de type PEMFC (membrane), mais n'empêche malheureusement pas totalement le passage du méthanol dissous dans l'eau vers la

cathode. Ce phénomène de méthanol diffusé de l'anode à la cathode appelé (crossover) a un impact négatif sur les caractéristiques de la batterie de type DMFC, ce qui conduit à :

- Une diminution de l'activité de la cathode avec formation de dioxyde de carbone coté cathode.
- Une réduction de l'activité catalytique due à un empoisonnement au platine côté cathode due à la présence de méthanol.
- Le méthanol qui traverse la membrane n'entre pas dans la réaction d'oxydation et entraîne une perte d'énergie **[16,17]**.

➢ **Catalyseur**

Il est similaire à celui de la pile à combustible type PEM, platine/ruthénium à l'anode et le platine seul à la cathode (sous forme de très fines particules).

➢ **Électrodes**

Comme pour la PEMFC (dépôt de poudre de carbone sur un support).

➢ **Couche de diffusion de gaz**

C'est le même type de Couche que pour la PEMFC.

I.5.2.3 Principe de fonctionnement

La pile à combustible à méthanol direct fonctionne généralement à une température de 60 °C. Le combustible est de méthanol CH_3OH utilisé à l'anode, en solution aqueuse (l'usage d'un combustible liquide donne une simplification aux systèmes de stockage et d'alimentation) et le comburant est de l'oxygène à la cathode **[17]**. Les ions qui traversé l'électrolyte sont des H^+ comme indiqué la figure suivant :

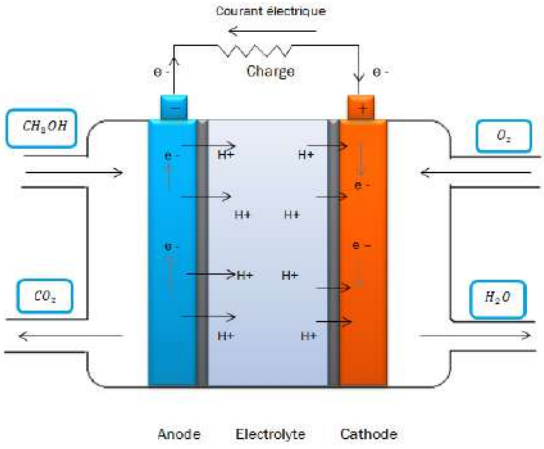


Figure I.9 : Schéma de principe d'une cellule élémentaire du DMFC.

Le principe de fonctionnement de la pile type DMFC repose sur l'oxydation du méthanol CH_3OH à l'anode (émettrice d'électrons) selon la demi-réaction :

$$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6\,H^+ + 6\,e^- \quad (I.7)$$

Et la réduction d'oxygène à la cathode (réceptrice d'électrons) selon la demi-réaction:

$$\frac{3}{2}O_2 + 6\,e^- + 6\,H^+ \rightarrow 3\,H_2O \quad (I.8)$$

Aboutissant à la production simultanée d'eau, d'énergie électrique, le dioxyde de carbone et de chaleur comme indique le bilan globale de la réaction :

$$CH_3OH + 3/2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O_{(liquide)} + \text{électricité} + \text{chaleur} \quad (I.9)$$

I.5.2.4 Avantages et inconvénients

Le tableau suivant représente les principaux avantages et inconvénients du pile à combustible de type DMFC.

Tableau I.2: Avantages et inconvénients du DMFC **[16,17]**.

Les avantages	Les inconvénients
Démarrage instantané aussi un temps de réponse très rapide.	Faible rendement réel.
Facilité d'usage du méthanol.	Transit de méthanol à travers l'électrolyte (crossover).
Conception compacte.	Le coût du catalyseur et de la membrane est élevé.
Il n'est pas sensible au dioxyde de carbone.	Cartouches de méthanol encore transportées dans des avions non autorisés.
Fonctionnement à basse température.	La production de $\mathbf{CO_2}$.
Système simple.	La durée de vie de cette pile à améliorer.
Il n'y a pratiquement pas d'hydratation supplémentaire de la membrane.	

I.5.3 Pile à combustible à l'éthanol direct DEFC

Le développement de la pile type DMFC abouti à une nouvelle pile, qu'est la pile à combustible à éthanol direct DEFC. Le combustible est l'éthanol C_2H_5OH qui est donne plus

d'avantages par rapport le méthanol. C'est parce que l'éthanol moins toxique et produit à partir des composés agricoles (renouvelables). Aussi il a une grande densité énergétique théorique par rapport le méthanol **[16]**.

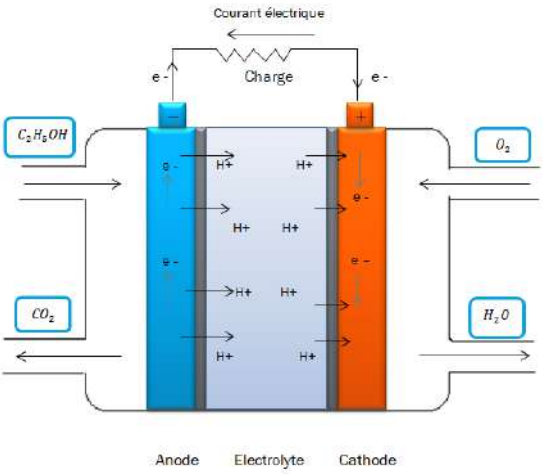


Figure I.10 : Schéma de principe d'une cellule élémentaire du DEFC.

Le principe de fonctionnement de cette pile (DEFC) repose sur l'oxydation d'éthanol C_2H_5OH à l'anode, selon la demi-réaction :

$$C_2H_5OH + 3\,H_2O \rightarrow 2\,CO_2 + 12\,H^+ + 12\,e^- \qquad (I.10)$$

Et la réduction d'oxygène à la cathode, selon la demi-réaction:

$$3\,O_2 + 12\,e^- + 12\,H^+ \rightarrow 6\,H_2O \qquad (I.11)$$

Aboutissant à la production simultanée d'eau, d'énergie électrique, le dioxyde de carbone et de chaleur comme indique le bilan globale de la réaction suivant :

$$C_2H_5OH + 3\,O_2 \rightarrow 2\,CO_2 + 3\,H_2O_{\,(liquide)} + \text{électricité} + \text{chaleur} \qquad (I.12)$$

I.5.4 Pile à combustible à acide phosphorique PAFC

I.5.4.1 Historique

En 1842, **William Robert Grove** a utilisé l'acide sulfurique comme électrolyte dans la première pile à combustible. Il a suivi de nombreux développements dans le but d'éliminer l'utilisation d'électrolyte liquide.En 1961, le résultat fut l'utilisation d'acide phosphorique stable dans la matrice de poudre de silice comme électrolyte.

Au milieu de 1960, les Japonais et les Américains ont commencé a évoluer les piles à combustible à l'acide phosphorique **[16,17]**.

I.5.4.2 Structure de PAFC

- **Électrolyte**

Dans cette pile, l'électrolyte est un acide phosphorique fixé par une matrice de carbure de silicium (CSi) en couche mince d'épaisseur (0,1 à 0,2 mm), avec une liaison de type PTFE organique **[16,17]**.

- **Électrodes**

Les électrodes sont en matériau carbone avec un liant/revêtement en PTFE. Le groupe forme une structure poreuse, pour simplifier la circulation des gaz et de l'eau produits. Cet ensemble est monté sur un cadre en graphite qui fait également comme un collecteur de courant **[16,17]**.

- **Catalyseur**

Sur l'anode et à la cathode, on utilise généralement du platine ou du platine / métal, tel que (le nickel). Il est en général positionné sur de fines particules de carbone **[16,17]**.

I.5.4.3 Principe de fonctionnement

La PAFC fonctionne généralement à une température environ 200 °C. Le combustible est de l'hydrogène utilisé à l'anode. Comme l'anode tolère le CO_2 sans affecter sur les performances de la pile, il est possible d'utiliser l'hydrogène provenant de la décomposition des hydrocarbures. Le comburant est de l'oxygène à la cathode et les ions qui traversé l'électrolyte sont des H^+. La figure suivant représente schéma de principe d'une cellule élémentaire **[17]**.

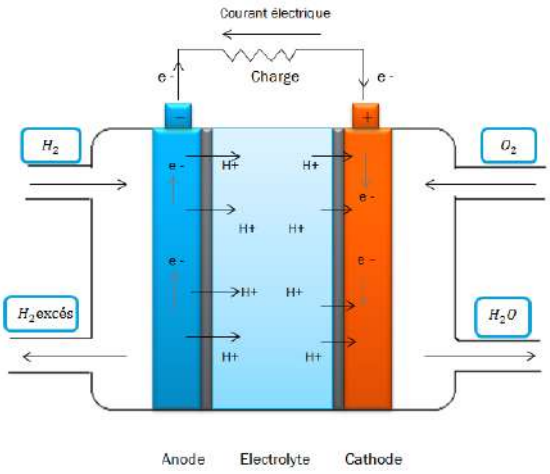


Figure I.11 Schéma de principe d'une cellule élémentaire du PAFC.

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible PAFC repose sur l'oxydation de l'hydrogène à l'anode selon la demi-réaction :

$$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^- \qquad (I.13)$$

Et la réduction d'oxygène à la cathode selon la demi-réaction:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2\,e^- + 2\,H^+ \rightarrow H_2O \qquad (I.14)$$

Aboutissant à la production simultanée d'eau, d'énergie électrique et de chaleur comme indique le bilan global de la réaction suivant :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{(liquide)} + \text{électricité} + \text{chaleur} \qquad (I.15)$$

I.5.4.4 Avantages et inconvénients

Le tableau suivant représente les principaux avantages et inconvénients du pile à combustible de type PAFC.

Tableau I.3: Avantages et inconvénients du PAFC **[16,17,21]**.

Les avantages	Les inconvénients
Insensible au dioxyde de carbone.	Démarrage lente.
Application de cogénération (rendement environ de 85%en cogénération).	Catalyseur très cher.
Disponible dans le commerce.	La rénovation de l'acide phosphorique est nécessaire.
Longue durée de vie.	Sensibilité au soufre.
	Contrôle de température difficile.
	ne supporte pas les arrêts.
	L'électrolyte s'évapore et les électrodes sont corrodées par le milieu acide de la pile.

I.5.5 Pile à combustible à alcaline AFC

I.5.5.1 Historique

La pile alcaline est la plus ancienne. Francis Thomas Bacon a repris les travaux de Mond et Langer. En 1959 il a présenté une pile à combustible de 5 KW pratt&whitney a acquis une licence pour le programme spatial Apollo qui s'est ensuite étendu à la navette spatiale.

En 1959, la première pile de type AFC utilisée sur un « véhicule » a été développé pour démonstration sur un tracteur de la société Allis-chalmers. Parallèlement, union carbide a développé des piles à combustible sur le même principe. Au milieu des années 1960, varta en Allemagne a développé une pile de type AFC compacte (Eloflux) **[17]**.

I.5.5.2 Structure

- **Électrolyte**

Elles utilisent un électrolyte liquide constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium qui a l'avantage d'accélérer la réduction de l'oxygène **[25]**, il est Concentrée (30 à 85 % selon la température de fonctionnement) stabilisé dans une matrice ou mis en circulation par l'intermédiaire d'une pompe, en fonction du domaine d'utilisation (spatiale ou terrestre).

L'hydroxyde de potassium est sensible au dioxyde de carbone Co_2, cette réaction conduit à la formation de carbonate K_2CO_3, selon l'équation de réaction suivante :

$$CO_2 + 2\,KOH \quad \rightarrow \quad K_2CO_3 + H_2O \qquad (\mathrm{I},16)$$

Le carbonate K_2CO_3 formé, insoluble dans l'électrolyte, bloque les pores, ce qui réduit la mobilité des ions (une partie de ions OH^- n'est ainsi pas disponible pour l'oxydation de l'hydrogène) et réduit le rendement de la pile à combustible **[17]**.

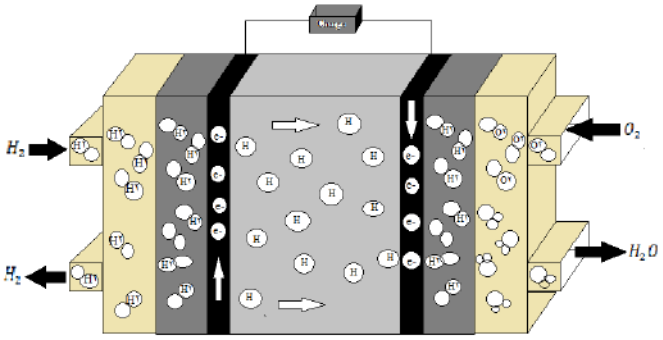


Figure I.12 : Pile combustible de type AFC.

- **Électrodes**

Les électrodes de la pile de type AFC sont en nickel ou en graphite.

- **Catalyseur**

Les catalyseurs employés dans ce type de pile ne nécessitent pas de métaux précieux. Le nickel à l'anode ou l'argent à la cathode peuvent catalyser les réactions. D'autres combinaisons sont

possibles avec des métaux précieux comme le platine/palladium à l'anode ou le platine/or à la cathode **[17]**.

I.5.5.3 Principe de fonctionnement

La pile à combustible alcaline fonctionne généralement à une température comprise entre 60 et 90°C. Cette technologie simple pourrait permettre d'atteindre des coûts assez bas mais, de par son principe, elle est handicapée par la nécessité de devoir traiter l'air - la source de comburant oxygène- pour éliminer le CO_2, polluant majeur de son électrolyte (solution de potasse). Toutefois, des recherches se poursuivent pour contourner cette difficulté en tentant de développer une membrane électrolyte solide conductrice pour les ions OH-.

Il existe deux modes de fonctionnement : électrolyte fixe ou en circulation.

Pour les piles à électrolyte fixe, celui-ci est intégré à une matrice poreuse qui le stabilise. Si la structure est plus simple que pour l'électrolyte en circulation, l'évacuation de la chaleur est plus délicate. L'eau produite entraine une dilution de l'électrolyte, donc une détérioration de ces caractéristiques. La formation éventuelle de carbonates réduit les performances. Cette technologie est cependant très fiable.

La circulation de l'électrolyte à l'aide d'une pompe offre certains avantages tels que: Gestion thermique facilitée et homogénéisation de la concentration de l'électrolyte...etc.

En revanche :

L'hydroxyde de potassium est corrosif (tenue des matériaux et sécurité de fonctionnement) ;

Le système est complexe en raison des composantes annexes.

Combustible et comburant :

Le combustible utilisé est l'hydrogène pur.

L'air peut être utilisé comme comburant en place de l'oxygène mais le CO_2doit en être éliminé **[17,26]**.

I.5.5.4 Réactions

À l'anode:

$$H_2 + 2\,OH^- - \text{Ni} \rightarrow 2\,H_2O + 2\,e^- \qquad (\text{I.}17)$$

À la cathode:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2\,e^- + H_2O - \text{Ag} \rightarrow \quad 2\,OH^- \qquad \text{(I. 18)}$$

Bilan :

$$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O_{(\,liquide)} + \text{chaleur} \qquad \text{(I. 19)}$$

I.5.5.5 Avantages et inconvénients

Le tableau suivant représente les principaux avantages et inconvénients du pile à combustible de type AFC.

Tableau I.4: Avantages et inconvénients du AFC **[17,27]**.

Les avantages	Les inconvénients
Rendement électrique élevé.	La nécessité d'utiliser du gaz pur.
Fonctionne à basse température et dans une large gamme.	Durée de vie courte (8000 h).
Faible cout de l'électrolyte.	Sensible au CO_2.
Catalyseurs non précieux.	Electrolyte liquide et corrosive.

I.5.6 Pile à combustible à carbonate fondu MCFC

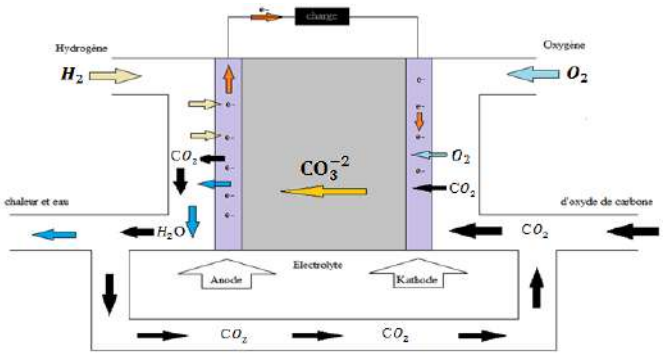


Figure I.13 : Pile à combustible de type MCFC.

I.5.6.1 Historique

En 1921, les suisses Baur et Preis ont étudié une série d'électrolyte, dont des carbonates fondus, utilisables à haute température. Mais ils ont rencontré des problèmes de conductivité électrique et de réactions chimiques secondaires incontrôlées. A la fin des années 1950, deux chercheurs hollandais (G.H.J.Broers et J.A.A. ketelaar) ont succédé en développant une pile à combustible sur ce principe.

Au milieu des années 60, l'U.S. Army's Mobility Equipment Research and Développement Center (MERDC) à Ft. Belvoir, teste plusieurs cellules à carbonate fondu fabriquées par Texas Instruments. Elles couvrent la gamme de 100 watts à 1 000 watts et sont destinées à fonctionner avec un combustible militaire en utilisant un reformeur externe **[17,28,29]**.

I.5.6.2 Structure d'une cellule élémentaire

- **Électrolyte**

L'électrolyte est constitué d'un mélange de carbonate (Li_2CO_3, K_2CO_3) retenu par une matrice poreuse d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAIO2) sous forme de plaques de 0,5 à 1,0 mm d'épaisseur. Une bonne conductivité ionique des carbonates est obtenue à des températures de 600 à 700 °C. A ces températures, l'électrolyte est liquide, la température de fusion se situant entre 450 et 500 °C **[17]**.

- **Électrode et catalyseur**

La conception des électrodes doit être améliorée pour permettre un contacte optimal entre les gaz et l'électrolyte, généralement en modifiant le diamètre des trous ou la porosité des électrodes. Ces piles fonctionnent à des températures élevées (600°C à 700°C) ce qui améliore la cinétique de la réaction de réduction de l'oxygène et rend inutile l'utilisation de métaux nobles comme catalyseurs.

L'utilisation du nickel est un compromis permettant d'avoir électrode et catalyseur dans le même matériau, le nickel s'étant avéré un catalyseur efficace et résistant, on utilise un alliage nickel/chrome ou nickel/aluminium (anode) et un oxyde de nickel poreux dopé au lithium (cathode) **[17]**.

I.5.6.3 Principe de fonctionnement

Cette pile fonctionne généralement à des températures comprises entre 600 et 700 °C. Le soufre doit être éliminé, car il agit comme un inhibiteur de La réaction à l'anode.

Le combustible est l'hydrogène généralement produit par les réactions de décomposition des hydrocarbures à l'intérieur de la pile et le comburant est un mélange de CO_2 et O_2 **[17]**.

I.5.6.4 Réactions

À l'anode :

$$H_2 + (CO_3)^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2\,e^- \qquad (I,20)$$

à la cathode :

$$CO_2 + 2\,e^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow (CO_3)^{-2} \qquad (I,21)$$

Bilan :

$$H_2 + 1/2\, O_2 + CO_2 \rightarrow \quad H_2O_{(vapeur)} + CO_2 + \text{chaleur} \qquad (I, 22)$$

I.5.6.5 Avantages et inconvénients

Le tableau suivant représente les principaux avantages et inconvénients du pile à combustible de type MCFC.

Tableau I.5: Avantages et inconvénients du MCFC **[17,27,28]**.

Les avantages	Les inconvénients
Production d'hydrogène en interne à partir d'hydrocarbures.	Instabilité de l'électrolyte.
Rendement élevé.	Sensibilité au soufre.
bonne fiabilité.	électrolyte liquide et corrosif (carbonates fondus).
Rendement technologique, calculé en tenant compte du système entier, assez élevé (54%).	Perte d'électrolyte.
Insensible au CO.	Faible densité de courant.
Catalyseur en nickel.	Dissolution de la cathode (en nickel).

I.5.7 Pile à combustible à oxyde solide SOFC

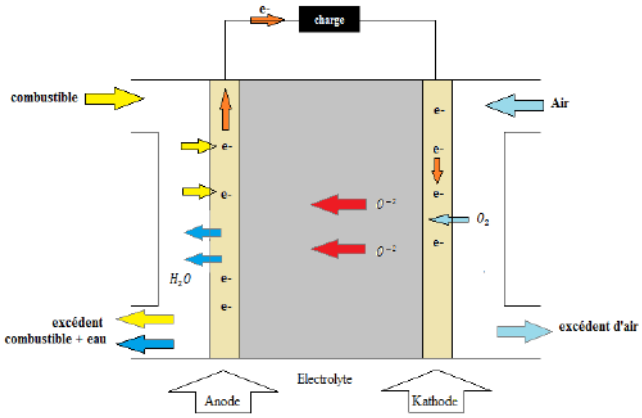


Figure I.14 : Pile à combustible de type SOFC.

I.5.7.1 Historique

Bauer et Preis ont développé en 1937 une pile à combustible à oxyde solide SOFC fondée sur les découvertes de Nernst En 1899. En 1962, Weissbart et Ruka (Westinghouse Electric Corp). Utilisez un électrolyte à base de zirconium, avec de l'oxygène à la cathode et de l'hydrogène ou du méthane dans l'anode **[17]**.

I.5.7.2 Structure

La caractéristique principale de cette pile est qu'elle fonctionne à haute température qui est de l'ordre de 900 à 1000°C. Dans ce type de pile à combustible, ce sont les ions O^{-2} qui circulent dans l'électrolyte. Il existe deux types principaux de structures : tubulaire ou planaire.

- **Structure tubulaire**

Cette structure est la plus ancienne, réalisée à l'origine par le groupe Westinghouse l'ensemble membrane-électrode a la forme d'un tube fermé à une extrémité. Le comburant circule à l'intérieur du tube alors que le combustible circule à l'extérieur **[17]**.

- **Structure planaire**

La structure planaire offre une compacité importante par rapport à la structure tubulaire. La conductivité ionique de l'électrolyte dépendant de la température, une réduction de l'épaisseur de l'électrolyte permet de diminuer la température de fonctionnement, d'où le développement d'une structure où l'anode supporte l'électrolyte qui peut ainsi être déposé en couche mince. Il existe deux approches pour les cellules élémentaires :

- Structure classique où les composantes (électrodes et électrolyte) sont empilés sous forme de plaques ou feuilles, l'accès du combustible et comburant se faisant par les deux faces opposées.
- Structure concentrique avec accès du combustible par le centre **[17]**.

✓ **Électrolyte**

L'électrolyte est un mélange d'oxydes appelé YSZ (yttrium stabilized zirconia) qui est composé d'oxyde de zirconium (ZrO_2) stabilisé par l'yttrium (Y_2O_3, 8 à 10 %). La conductivité ionique de cet électrolyte est suffisante à très haute température (environ 0,13 S.cm^{-1} à 1000°C). Dans un électrolyte solide, la conductivité ionique est due aux défauts dans la structure cristalline.

Ces défauts sont créés en dopant l'électrolyte par de l'yttrium, par exemple (cas de l'oxyde zirconium). Pour les piles à structure tubulaire, l'épaisseur de l'électrolyte déposé en phase vapeur est d'environ 40 μm [**17**].

- ✓ **Électrodes**

Ils doivent avoir une conductivité électrique élevée avec une porosité qui permet la propagation du combustible et le comburant vers l'électrolyte ainsi qu'une bonne stabilité mécanique et chimique. Elles sont en composite céramique métal (cermet ou nickel stabilisé par le mélange YSZ) pour l'anode et en oxydes mixtes de lanthane-strontium-magnésium (LSM) pour la cathode.

Pour les piles de type planaire, l'anode fonctionne comme un support, tandis que les batteries de type tubulaire, la cathode est le support de l'électrolyte et de l'anode **[17]**.

- ✓ **Catalyseur**

Les métaux précieux ne doivent pas être utilisés comme catalyseurs, aux températures de fonctionnement atteintes.

I.5.7.3 Principe de fonctionnement

Cette pile fonctionne généralement à des températures comprises entre 850 à 1000°C. Pour les combustible et les comburant à des températures de fonctionnement élevées permettent l'utilisation de gaz autres que l'hydrogène, tels que: le gaz naturel, mélange de méthane et de CO **[17]**.

I.5.7.4 Réactions

À l'anode :

$$H_2 + O^{-2} \rightarrow H_2O + 2\,e^- \qquad (I.23)$$

Ou **:**

$$CO + O^{-2} \rightarrow CO_2 + 2\,e^- / CH_4 + 4O^{-2} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8\,e^- \qquad (I.24)$$

À la cathode :

$$1/2\,O_2 + 2\,e^- \rightarrow O^{-2} \qquad (I.25)$$

Bilan :$H_2 + 1/2\,O_2 \rightarrow H_2O_{(\text{vapeur})}$ + chaleur (I.26)

I.5.7.5 Avantages et inconvénients

Le tableau suivant représente les principaux avantages et inconvénients du pile à combustible de type SOFC.

Tableau I.6: Avantages et inconvénients du SOFC **[17,27,30]**.

Les avantages	Les inconvénients
La possibilité de fonctionner avec divers carburants: hydrogène, hydrocarbures liquides, gaz naturels.	Résistance des matériaux (hautes températures).
Electrolyte stable.	Sensibilité au soufre.
Une bonne fiabilité.	Une température de fonctionnement élevée, donc un temps de démarrage relativement long.
Une insensibilité à la présence de CO dans l'hydrogène.	Sensibilité à la variation de température de fonctionnement.
Cogénération avec ou sans La fourniture d'une chaleur élevée facilement.	La mise au point de ce type de pile implique, de par cette haute température de fonctionnement, la résolution de problèmes thermomécaniques de tenue de matériaux assez complexes.
Rendement électrique élevé.	Evacuation de la chaleur.
Pas de catalyseurs précieux.	

I.6 Caractéristiques et performances

Nous résumons les caractéristiques et les performances pour différentes piles à combustible dans le tableau suivant:

Tableau I.7 : Caractéristiques principales des différentes PAC **[16,17]**.

Caractéristique	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Rendement électrique	20 à 80%	~30 à 50%	40 à 55 %	> 60%	jusqu'à 55 %	jusqu'à 60 %
Tension réelle	0,6 à 0,95 V	0,4 à 0,7 V	0,5 à 0,8 V	0,7 à 1,0 V	0,75 à 0,90 V	0,7 à 1,15 V
Densité de courant	jusqu'à plusieurs A/cm^2	100 à 200 mA/cm^2	jusqu'à 800 mA/cm^2	100 – 200 mA/cm^2	jusqu'à 200 mA/cm^2	jusqu'à 1000 mA/cm^2
Temps de démarrage	Pratique-ment instant-né	Instanta-né	1 à 3 h	Quelques dizaines de minutes	jusqu'à quelques heures	jusqu'à plusieu-rs heures
Temps de réponse	Très rapide	Très rapide	Très rapide	Relativeme nt rapide	fonction de la taille	Lent
Durée de vie	> 10 000 h	-	> 40 000 h	Environ 5000 h	Plusieu-rs milliers d'heures	> 40 000 heures

I.7 Applications des piles à combustible

La première utilisation de piles à combustible était dans les programmes spatiaux de NASA en 1960, pour générer l'eau, la chaleur et l'énergie que alimenté les satellites et les capsules spatiale **[17]**. Apres le développement technologique, les PAC ont été utilisées dans les applications suivant :

I.7.1 Transports

Il s'agit du domaine de mise en œuvre le plus important, car les mesures de sécurité doivent prendre en compte non seulement l'application mais aussi l'environnement. Ces domaines sont constitués de :

Les transports terrestres : les véhicules électrique (véhicules légers, bus, scooter.).

Les transports maritimes : navires, sous-marins, bateaux électriques.

Transport aériens : les avions monomoteurs, les avions multi moteurs sans pilote **[16,17]**.

Figure I.15 : Quelques exemples d'applications des PAC dans les domaines transports **[31-34]**.

I.7.2 Applications stationnaires

Cette application concernant les installations fixes qui peuvent alimenter les habitations individuelles, les habitations collectives, hôpitaux, les installations industrielles.

Figure I.16 : Unité de 1 MW de type PEMFC de la société canadienne BALLARD **[35]**.

I.7.3 Applications portables

Représente les PAC d'une puissance de quelques dizaines de watts jusqu'au kilowatt. Pour objectif de changer les batteries de forte puissance (qui doivent être rechargées), avec un meilleur rendement et plus d'autonomie.

Figure I.17 : Pile à combustible avec réservoir de méthanol. **[SFC Smart Fuel Cell AG].**

I.7.4 Applications dans l'industrie électronique

Cette famille représente les PAC avec une puissance de quelques centaines de watts à quelques watts, pour des applications mobiles telles que téléphones portables, ordinateurs portables ou même tablettes tactiles... etc. Leur autonomie est considérablement augmentée grâce à la pile à combustible.

Figure I.18 : Quelque exemple des PAC à faible puissance **[36,37,38]**.

I.7.5 Application pédagogiques ou pour formation

De nombreuses applications utilisent souvent un véhicule miniature équipé d'un moteur électrique, d'une pile à combustible de type PEMFC ou DMFC ainsi que d'un réservoir de stockage du combustible et fournissant l'hydrogène stocké dans un ballon gonflable placé dans le véhicule.

Muni d'un voltmètre/ampèremètre, d'un chronomètre, d'une boîte de résistances (ou de LED) ainsi que d'un manuel, il est déjà possible d'effectuer des manipulations simples qui permettront de s'initier à la pile à combustible et son fonctionnement. Il est aussi possible d'utiliser une interface pour ordinateur pour la rentrée 2011-2012, l'académie de Bretagne a équipé les 22 lycées avec un véhicule télécommandé hybride (pile à combustible et batteries) de la société Tamiya (japon).

Pour un niveau plus élevé, les différents équipements des sociétés françaises Pragma industries (Professional Pack avec pile de 7 W) et allemande heliocentris (Instructor Training avec pile de 50W) permettent des mesures plus fines et plus complètes **[17]**.

Figure I.19 : Voiture à hydrogène à pile réversible [HO-FCJJ11] **[39]**.

I.7.6 Application militaires

Les armées ont aussi vu les avantages de la pile à combustibles, que ce soit au niveau autonomie possible, signature thermique faible ou absence de bruit. Il faut plus particulièrement citer le ministère de la défense américain qui, dès les années 1960, a soutenu la recherche sur les piles à combustible.

Un exemple est la pile à combustible jenny utilisée par les soldats des Forces spéciales en campagne. Le soldat la porte avec de petites cartouches dans son gilet contre son corps et alimente avec elle de nombreux appareils qu'il a sur lui, par exemple des appareils de visibilité nocturne et des systèmes GPS, etc. Avec un poids d'environ 1 kg, la pile à combustible Jenny procure dans cette application une économie de poids dramatique de 80 pour-cent par rapport aux batteries emportées préalablement.

Figure I.20 : Pile à combustible portable JENNY SFC SMART FUEL CELL **[40]**.

I.7.7 Alimentation auxiliaire ou secours

Ce type de générateur est largement utilisé dans le domaine de l'aviation, car tous les avions contiennent des turbines qui produisent de l'énergie électrique ou hydraulique lorsque les moteurs ou réacteurs ne fonctionnent pas.

Les piles à combustible peuvent également être utilisées dans toute application nécessitant de l'électricité ou de la chaleur. Pour une application mobile lorsque le moteur ne tourne pas, cette alimentation par pile à combustible peut être une source d'électricité à l'arrêt (camion frigorifique, véhicule léger). Pour les applications fixes, il peut s'agir soit d'une source d'alimentation de secours en cas de panne de réseau, soit d'une source d'alimentation principale s'il n'y a pas d'accès au réseau (les camions frigorifiques, les bus dont les besoins électriques à l'arrêt ou en fonctionnement sont croissant).

Les avantages de l'utilisation des piles à combustible sont une autonomie accrue, une réduction de la pollution et du bruit en fonctionnement **[17]**.

Figure I.21 : Pile à combustible efoy, fiche pratique camping-car.

Les domaines potentiel d'utilisation des piles à combustible et les puissance délivrées en résumé dans le tableau suivant:

Tableau I.8: Domaine potentiel d'utilisation **[16,17]**.

Application	Puissance	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Portable	1 W – 100 W	✓	✓				✓
Transporta-ble	1 KW – 10 kW	✓	✓		✓		✓
Transports, Stationnaire	10 KW – 100KW	✓					✓
Central	100 kW – 3 MW	✓		✓		✓	✓

I.8 Conclusion

Ce chapitre a été distingué en se référant au côté théorique, qui est un préambule et une définition des piles à combustible, avec mention de leurs types, caractéristiques, histoire...etc.
L'un des types de piles à combustible tell que : piles à combustible à membrane polymère ou à membrane échangeuse de protons, piles à combustible à l'éthanol (direct) et piles à combustible à oxyde solide.

Du préambule précédent, nous avons remarqué que les piles à combustible diffèrent entre elles en termes de structure, de principe de fonctionnement, d'avantages et d'inconvénients et d'applications. Parmi les caractéristiques les plus importantes de la pile à combustible figurent le combustible et le comburant. Comme nous l'avons noté dans la plupart des cas, l'hydrogène est le carburant et l'oxygène est l'oxydant.

CHAPITRE II

Modélisation et Caractérisation de la pile à combustible de type PEM

II.1 Introduction

La pile à combustible de type membrane échangeuse de protons (PEMFC) a attiré beaucoup d'attention dans les dernières années. Le générateur a été utilisé dans nombreux applications tel que les véhicules électriques. Une des choses les plus efficaces qui peuvent accroître l'utilisation de ce générateur par les chercheurs est la modélisation. L'existence d'un modèle mathématique peut aider à comprendre le comportement interne du générateur, et il facilite aussi le processus de développement des algorithmes de contrôle qui peut optimise le fonctionnement de source **[65]**.

Pour ces raisons, on va essayer dans ce chapitre à étudier le comportement interne de pile PEM par l'explication des processus électriques et chimiques qui déroule à l'intérieur de source.

Ce chapitre est divisé en trois parties, la première partie de chapitre explique décomposition interne de la pile PEM. La deuxième partie explique le rôle des éléments auxiliaires accompagnés avec la pile avec leur principe de fonctionnement. Le deuxième partie de chapitre illustre les équations mathématiques utilisées pour modéliser la pile.

II.2 Décomposition interne de la pile PEM

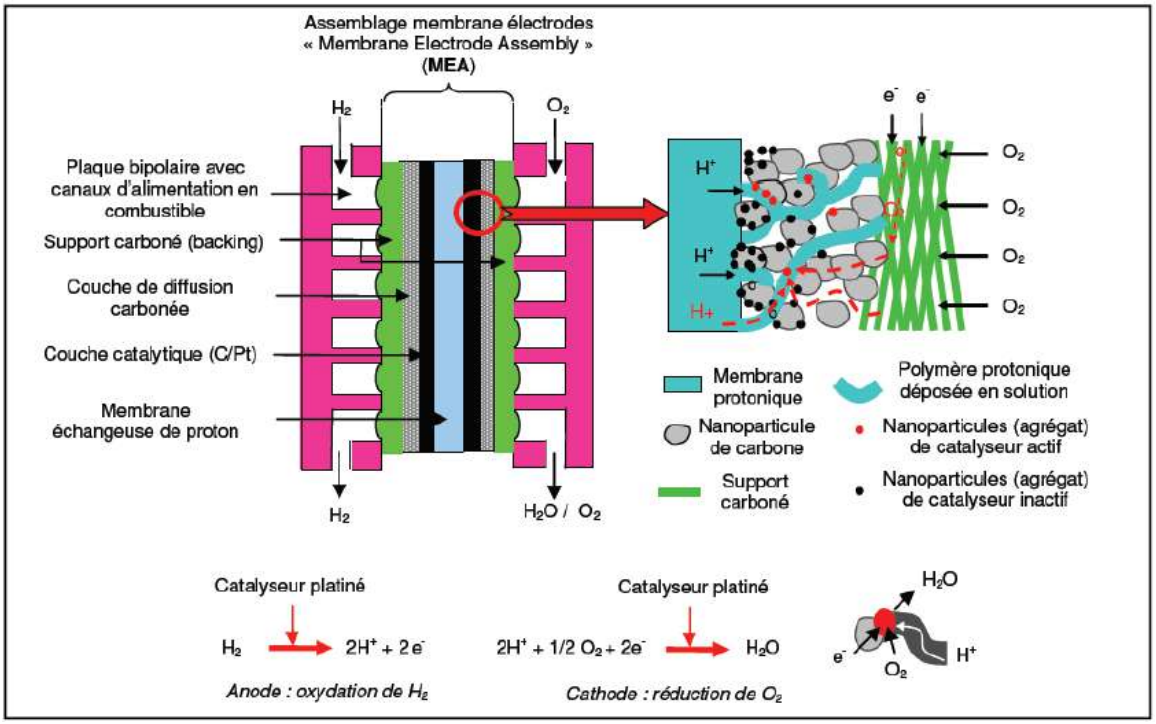


Figure II.1 : Pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC **[41]**.

En effet, la pile à combustible PEM est un système multi disciplinaire. Très souvent on trouve que le générateur est accompagné de nombreux éléments et composants qui assurent le fonctionnement optimal de source telle que :

II.2.1 Les électrodes

Les électrodes sont constituées par un feutre ou papier de carbone dont la face en contact avec l'électrolyte est enduite par une pâte contenant du carbone platiné, du poly-tétra-fluoro-éthylene (PTFE) et un électrolyte polymère conducteur protonique. Les électrodes volumiques, siège des réactions d'oxydoréduction, sont constituées de deux couches. La première est une couche de diffusion de gaz et la seconde est une couche active.

La couche de diffusion est composée généralement de carbone et de PTFE. Elle permet d'assurer la distribution des gaz vers la couche active. Cette alimentation doit être la plus homogène possible sur toute la surface de l'électrode et doit atteindre la plus grande partie du catalyseur, afin d'éviter le phénomène du point chaud dû au caractère exothermique de la réaction électrochimique.

La couche active est le siège de la réaction électrochimique. Elle doit donc assurer la présence du gaz réactif, des protons ainsi que des électrons : zone de triple contact (gaz/électrolyte/électrode). Les épaisseurs actuelles des électrodes sont de l'ordre de 400 µm, dont moins de 50 µm représentent la couche active **[42,43]**.

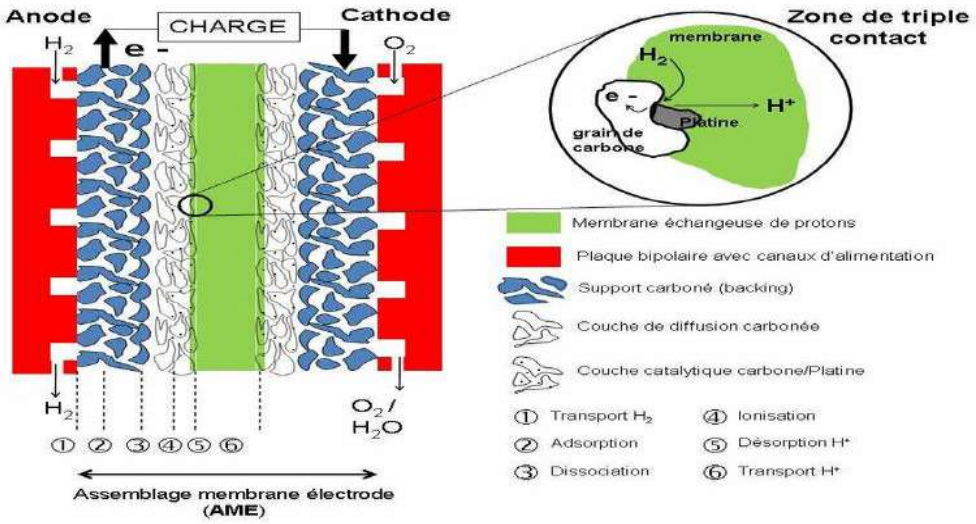


Figure II.2 : Représentation schématique de la zone de triple contact **[44]**.

II.2.2 La membrane

La membrane de PEMFC est un maillon très important de la chaîne de la conversion électrochimique de l'énergie. Ce dernière est une fine membrane polymère fabriquer partir de matière dite Nafion^{TM}. Cette matière a une base PTFE (poly-tétra-fluoro-éthylène hydrophobe) avec des groupes sulfoniques. Le rôle de membrane est de transférer les protons générés dans l'anode en oxydant l'hydrogène combustible à la cathode où il est impliqué dans la réduction de l'oxygène. L'électrolyte doit être caractérisé par les caractéristiques suivantes:

- Avoir une conductivité protonique la plus élevée possible.
- Isoler électriquement les deux électrodes.
- Séparez efficacement les gaz pour éviter tout contact direct entre les gaz (carburant et comburant).
- Il a une bonne résistance chimique et thermique dans ce milieu acide **[42,43]**.

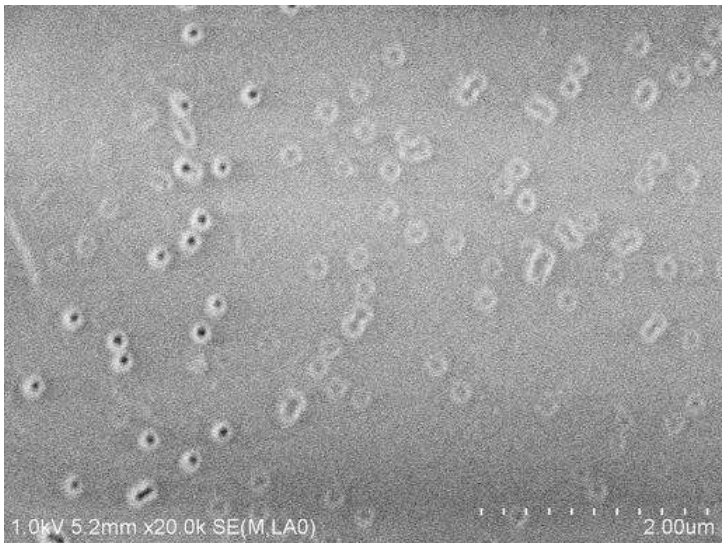


Figure II.3 : Nouvelles membranes conductrices de protons (biomimétiques) pour piles à combustibles PEMFC **[45]**.

II.2.3 L'assemblage des piles en séries

L'assemblage membrane-électrodes se compose :

- Une membrane d'électrolyte de polymère solide serrée entre deux électrodes de carbone poreuses.
- Un catalyseur à base de platine est intégré entre la membrane et les électrodes.
- Les électrodes incluent souvent des joints améliorant le contact avec les composants adjacents et évitant les fuites **[15]**.

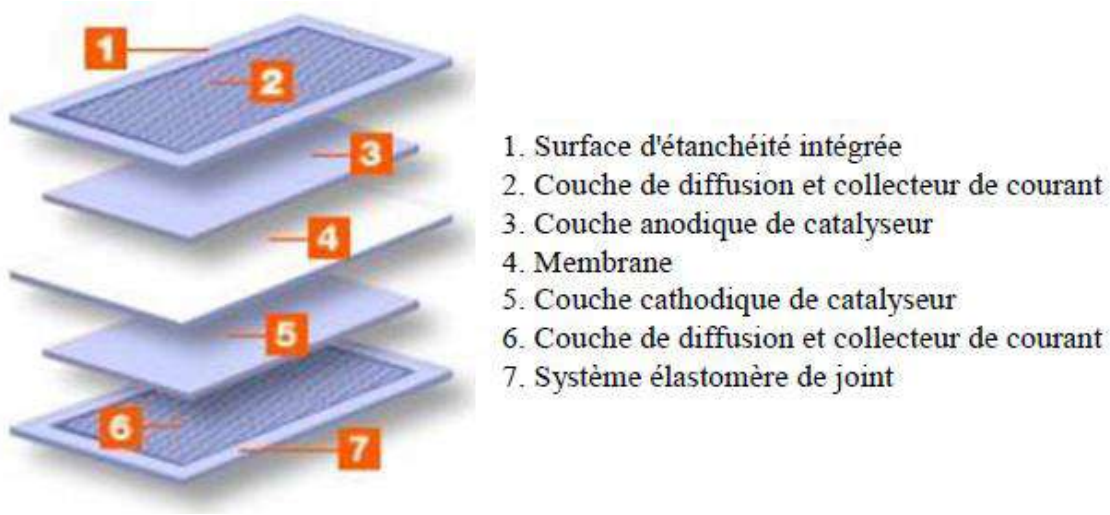


Figure II.4 : Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M **[46]**.

Le stack est un empilement de plusieurs cellules reliées électriquement en série et alimentées parallèlement en gaz pour avoir une puissance suffisant **[47]**. Cet empilement est formé par la connexion et le regroupement des cellules par des feuilles dipolaires. Le pôle positif de la première cellule est relié au pôle négatif de la cellule suivante. Ces plaques collectent le courant que chaque cellule primaire produit vers les électrodes de sortie, et assurent aussi:

- La circulation des différents fluides.
- Le refroidissement ou le chauffage.
- L'assemblage **[16,17]**.

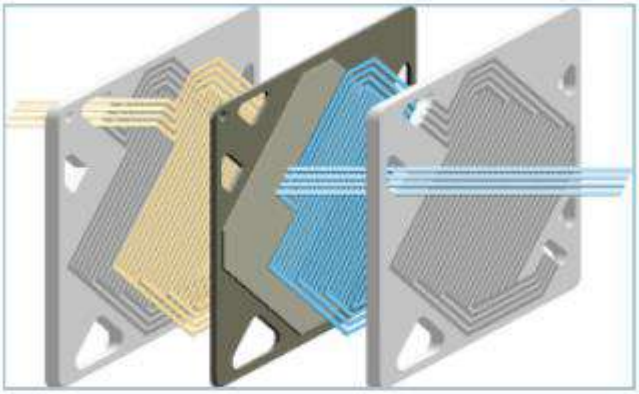


Figure II.5 : Plaques bipolaire de pile PEM **[15]**.

Mais nous devons tenir compte de deux observations importantes :

- ✓ La première observation est que l'utilisation d'une seule cellule ne permet pas de prédire le comportement réel d'un stack.
- ✓ La deuxième observation est l'hétérogénéité des conditions de fonctionnement Le stack, telles que:

- La différence de température et de tension d'une cellule à l'autre.
- Une diffusion non homogène en réactifs/produits dans l'assemblage **[37]**.

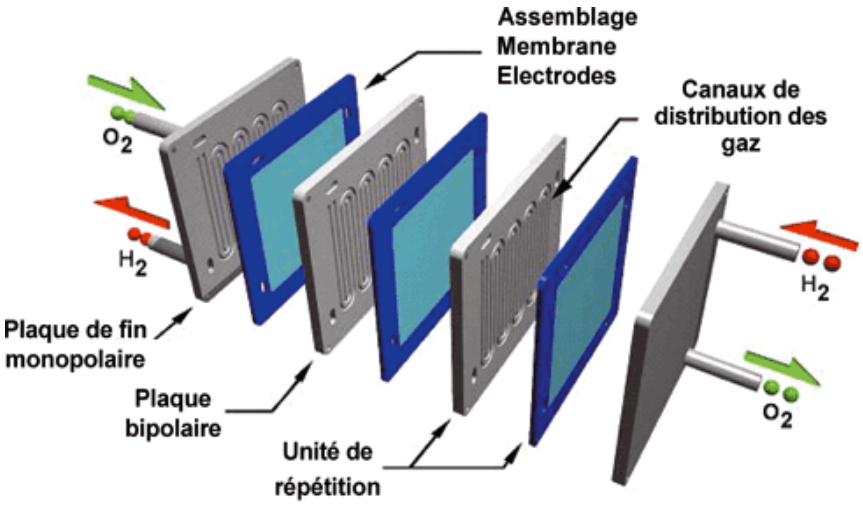


Figure II.6 : Structure d'un module à trois cellules **[24]**.

II.2.4 Les auxiliaires de pile PEM

II.2.4.1 Bouteille métal hydrure

La bouteille métal hydrure est utilisée pour stocker l'hydrogène sous forme métal hydrure, cette bouteille est souvent caractérisé par une pression de température de fonctionnement.

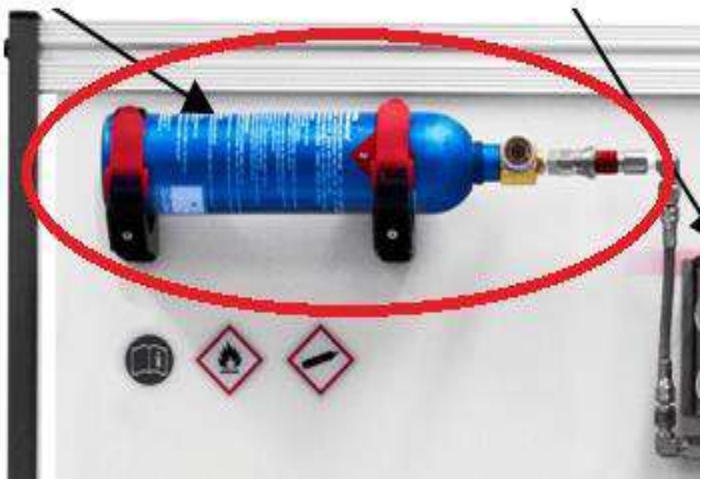


Figure II.7 : Bouteille métal hydrure.

II.2.4.2 Détendeur et manomètres

Il s'agit d'un dispositif installé entre la bouteille et la pile à combustible pour contrôler le débit d'hydrogène, le rôle de ce dispositif est de réduire et contrôler la pression (pression d'hydrogène) à l'entrée de la pile à combustible.

Le détendeur a deux possibilités d'entrée et deux manomètres, la première possibilité d'entrée par l'entrée de bouteille et la deuxième par le couplage de l'électrolyseur d'eau. Pour les deux manomètres, le premier consiste à mesurer la pression d'entrée et le deuxième c'est pour mesurer la pression de l'hydrogène entrant dans la pile à combustible.

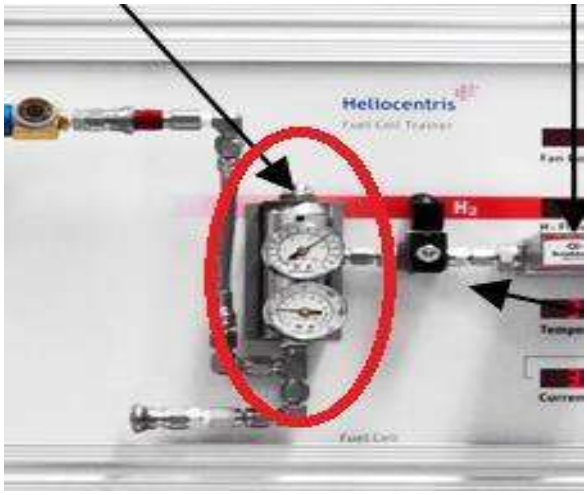


Figure II.8 : Détendeur et manomètres.

II.2.4.3 Ventilateur de refroidissement et alimentation d'oxygène

- **Système de refroidissement**

Il y a deux ventilateurs pour alimenter la pile à combustible en air et le refroidissement du stock durant le fonctionnement. Pour ajuster la vitesse de rotation de ces ventilateurs, il existe un système de contrôle qui leur est propre.

- **Vanne de purge**

Afin d'assurer le bon fonctionnement de la pile elle doit être pure à l'intérieur du stock, quand il est nécessaire, il y a une purge de divers gaz dans l'air parce que nous avons besoin seulement d'oxygène. Dans notre cas la vanne de purge s'ouvre automatiquement quand les impuretés sont logées dans les électrodes.

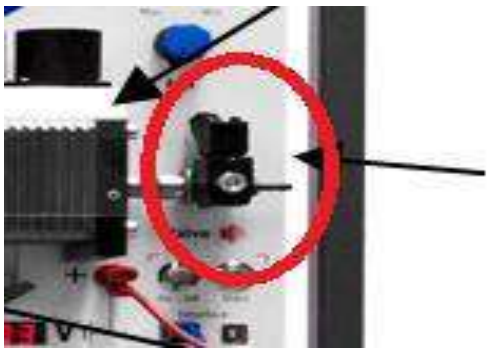


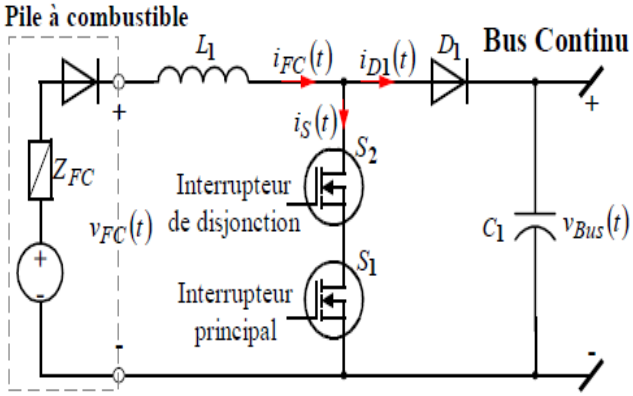
Figure II.9 : Vanne de purge.

II.2.4.4 Les convertisseurs de contrôle de tension

Convertisseur DC/DC

Le rôle du convertisseur est de convertir la tension variable de la pile à combustible en une tension de sortie constante. Ainsi il est possible d'alimenter tous les auxiliaires du banc, et la charge grâce à ce module.

La conversion entre la pile à combustible et le bus continu est une conversion DC/DC unidirectionnelle en courant (la pile à combustible n'est pas réversible en courant) **[15]**. Donc on trouve la structure classique du hacheur parallèle.



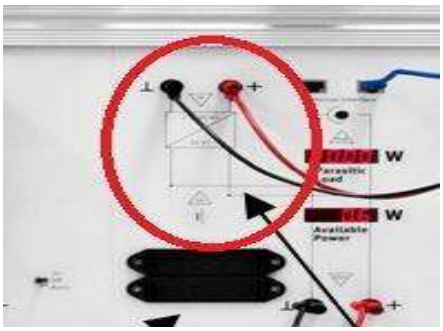


Figure II.10 : Convertisseur DC/DC.

L'interrupteur S1 protéger la pile contre une éventuelle défaillance.

L'inductance L1 régulateur de courant.

Interrupteur de disjonction S2 protéger la pile contre surcharge en courant **[48]**.

II.3 Modélisation mathématique de la pile

Comme nous avons dit dans la section précédente, la modélisation des piles à combustibles est une étape très importante pour comprendre le comportement de system. Pour ce raison, nombreux modèles de modélisation ont été proposés dans la littérature pour estimer la relation tension-courant de la pile, telles que :

- **Le modèle d'Amphlett [49].**
- **Modèle à base de réseau de neurones**

Le modèle de moyenne mobile autorégressive non linéaire de la pile à combustible PEM avec entrées externes est développé en utilisant les réseaux de neurones récurrents. Les données nécessaires pour entraîner le modèle de réseau neuronal sont générées en simulant le modèle d'espace d'états non linéaire de la pile à combustible PEM de 500 W.

On montre que le réseau de neurones à deux couches, avec une fonction sigmoïde tangente hyperbolique, en tant que fonction d'activation, dans la première couche, et une fonction linéaire pure, en tant que fonction d'activation, dans la seconde couche peut modéliser efficacement la dynamique non linéaire de la pile à combustible PEM **[50]**.

- **Modèle à base de logique floue**

Les informations de la modélisation de la carte cognitive floue sont applicables pour la modification de la structure des réseaux neuronaux pour fournir des résultats plus précis basés sur les connaissances extraites de la carte cognitive et la visualisation des performances du système.

Une carte cognitive floue basée sur des règles a été utilisée et peut être mise en œuvre pour la prise de décision afin de contrôler le système. Cette approche basée sur des règles offre une interprétabilité tout en améliorant les performances de l'ensemble du système **[51].**

Cependant, malgré l'existence de nombre important des modèles de modélisation, le modèle d'Amphlett reste le plus utiliser dans la littérature dus à sa simplicité et efficacité **[25]**. Ainsi, dus au degré d'acceptation, dans cette étude on va utiliser le modèle d'Amphlett pour modéliser les caractéristiques électriques des piles PEM.

II.3.1 Modèle d'Amphlett

Dans ce modèle, la potentielle thermodynamique théorique d'une pile à combustible PEM est d'environ 1.23, à une température de 25 °C et à une pression de 1 atmosphérique **[49]**. Mais, lorsqu'on relie la charge à la pile à combustible, la tension aux bornes de la pile ($\mathbf{V_{PAC}}$) diminue par rapport la tension théorique ($\mathbf{E_{nernst}}$) en raison de phénomènes de polarisation, à cause des pertes ou des chutes de tension engendrées par les irréversibilités du système (appelée aussi tension de polarisation) **[52]**. On peut distinguer trois formes de polarisation : ($\mathbf{V_{act}}$) la polarisation d'activation, ($\mathbf{V_{ohm}}$) la polarisation de résistance et ($\mathbf{V_{conc}}$) la polarisation de concentration comme la figure II.11 illustre:

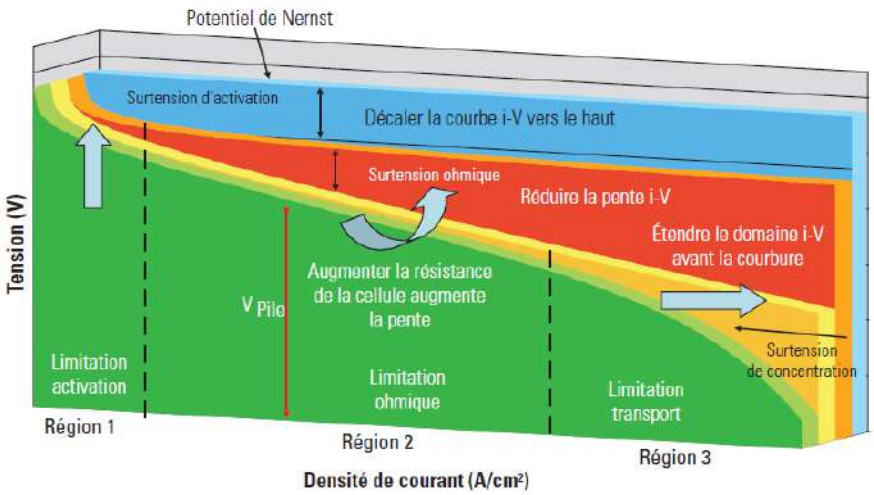


Figure II.11 : Courbe de polarisation typique d'une PAC **[53]**.

La différence de la tension d'activation et la tension de concentration dans la pile à combustible représentée par les résistances (R_{act}etR_{con}), en raison de l'effet du double couche de charge. Sachant que ce phénomène se produit lorsqu'il y a une accumulation de charges entre deux matériaux différents qui sont en liaison direct, la couche de charge à l'avant de l'électrode/électrolyte se comporte comme un condensateur **[49]**. Alors on peut tracer le circuit électrique équivalant du PAC comme suit :

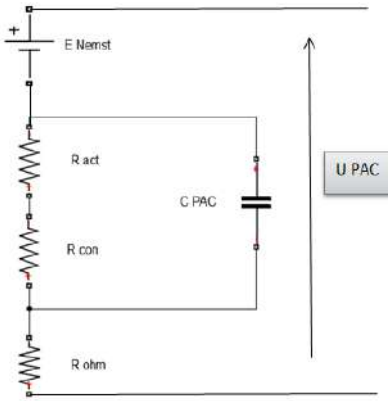


Figure II.12 : Schéma électrique équivalant d'une PAC.

Donc la tension de la pile (V_{PAC}) est exprimée comme suit :

$$V_{PAC} = n * (E_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}) \quad \text{(II.1)}$$

Avec :

n : Le nombre des cellules élémentaires de la pile.

E_{nernst} : La tension de Nernst.

V_{act} : La surtension d'activation.

V_{ohm} : La surtension ohmique.

V_{conc} : La surtension de concentration **[54]**.

II.3.1.1 La Tension de Nernst

C'est une potentielle thermodynamique réversible de chaque pile. Elle représente la tension à vide de la pile (tension théorique). Cette tension s'exprime comme suit:

$$E_{nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} - \frac{\Delta S}{2.F}(T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F}\left[ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2}ln(P_{O_2}^*)\right] \quad \text{(II.2)}$$

Où :

ΔG: Le changement d'énergie libre $(J/k.mol)$.

ΔS: Le changement d'entropie $(J/k.mol)$.

F: La constante de faraday (96,487 $C/k.mol$).

T: La température de fonctionnement de la pile (k).

T_{ref}: La température de référence (k).

R: La constante universelle du gaz (8,3 14 $J/k.mol$).

Lorsque nous substituons les valeurs standards pour la température et la pression, l'équation devient simplifiée comme suit **[55]**:

$$E_{nernst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T \times ln\left(P_{H_2}^* \sqrt{P_{O_2}^*}\right) \quad \text{(II.3)}$$

Avec :

$P_{H_2}^*$: La pression partielle à l'interface d'hydrogène (atm), elle donné comme suite :

$$P_{H_2}^* = 0.5 \times RH_a \times P_{H_2O}^{sat}\left(\frac{1}{\frac{RH_a \times P_{H_2O}^{sat}}{P_{anode}} exp\left(\frac{1.635\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)}{T^{1.334}}\right)} - 1\right) \quad \text{(II.4)}$$

$P_{O_2}^*$: La pression partielle à l'interface de l'oxygène (atm), elle donné comme suite :

$$P_{O_2}^{*} = RH_c \times P_{H_2O}^{sat}\left(\frac{1}{\frac{RH_c \times P_{H_2O}^{sat}}{P_{cathode}} exp\left(\frac{4.192\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)}{T^{1.334}}\right)} - 1\right) \quad (II.5)$$

Avec :

RH_a: L'humidité relative à l'anode.

RH_c: L'humidité relative à la cathode.

P_{anode}: La pression de l'hydrogène à l'anode.

$P_{cathode}$: La pression de l'oxygène à la cathode.

$P_{H_2O}^{sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié [**56, 57**]. Elle est calculée avec:

$$log_{10}\left(P_{H_2O}^{sat}\right) = 2.95 \times 10^{-2}(T - 273.15) - 9.19 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.44 \times 10^{-7}(T - 273.15)^3 - 2.18 \quad (II.6)$$

II.3.1.2 La surtension d'activation

Aux faibles densités de courant, les surtensions d'activations (polarisation d'activation) associée à l'énergie d'activation nécessaire pour démarrer la réaction entre les gaz surtout l'oxygène à la cathode **[16]**. La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant Présenté par JC Amphlett est donné comme suite :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2.T + \xi_3.T.ln([CO_2^{*}]) + \xi_4.T.ln(I_{PAC})] \quad (II.7)$$

Où :

ξ_1,ξ_2, ξ_3,ξ_4: coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC.

I_{PAC}: Le courant de fonctionnement de la pile (A).

$[CO_2^{*}]$: La concentration d'oxygène à la surface du catalyseur (mol/cm^3). Elle est exprimée par la loi de Henry comme suit **[58]**:

$$[CO_2^{*}] = \frac{P_{O_2}^{*}}{5.08 \times 10^6.e^{(-498/T)}} \quad (II.8)$$

II.3.1.3 La surtension ohmique

Aux moyennes densités de courant, la surtension ohmique (Polarisation ohmique) provoquée par les pertes ohmiques dues à la résistance électrique des différents éléments de la pile (électrolyte, électrodes) **[14]**. On peut exprimer par l'utilisation de la loi d'Ohm par l'équation suivante:

$$V_{ohm} = I_{PAC}.(R_m + R_C) \quad \text{(II.9)}$$

Avec:

R_C: La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons.

R_m: La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons. On peut calculer comme suite:

$$R_m = \frac{\rho_M.l}{A} \quad \text{(II. 10)}$$

Où :

l: L'épaisseur de la membrane (μm).

A: La surface active de la pile en (cm^2).

ρ_M: La résistivité spécifique de la membrane ($\Omega.cm$). Elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$\rho_M = 181.6.\frac{\left[1 + 0.03.\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.643 - 3.\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right].exp\left[4.18\frac{(T-303)}{T}\right]} \quad \text{(II. 11)}$$

λ_{H_2O/SO_3^-}:La teneur en eau dans la membrane **[59]**.

II.3.1.4 La surtension de concentration

Aux densités de courant élevées, la surtension de concentration (la polarisation de concentration) causée par la variation de concentration des réactifs (hydrogène ou oxygène) sur les électrodes**,** surtout à la cathode **[14]**. Ces pertes sont données par la relation suivante:

$$V_{con} = -b.ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad \text{(II. 12)}$$

Avec:

J : La densité de courant (A/cm^2).

J_{max} : La densité de courant maximale (A/cm^2).

b : La constante électrochimie (V) **[56]**.

Après avoir substituons les expressions de la tension de Nernst et des pertes (pertes d'activation, ohmique et de concentration) dans l'équation (II.1), nous obtenons le potentiel réel global (V_{PAC}) de la pile à combustible PEMFC comme suit :

$$V_{PAC} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} \times T \times ln\left(P_{H_2}^{*}\sqrt{P_{O_2}^{*}}\right)$$
$$+ [\xi_1 + \xi_2.T + \xi_3.T.ln([CO_2^{*}]) + \xi_4.T.ln(I_{PAC})]$$
$$- \frac{I_{PAC}}{A}\left[181.6.\frac{\left[1 + 0.03.\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{\frac{H_2O^-}{SO_3}} - 0.643 - 3.\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right].exp\left[4.18\frac{(T-303)}{T}\right]}.l + A \times R_C\right]$$
$$+ b.ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \qquad (II.13)$$

II.4 Caractérisation de la pile PEMFC

II.4.1 Caractéristique V-I de la PEMFC

La figure suivant montre la variation de la tension (V_{PAC}) de la PEMFC en fonction du courant (I_{PAC}) à T=30 °C et sous pression nominal.

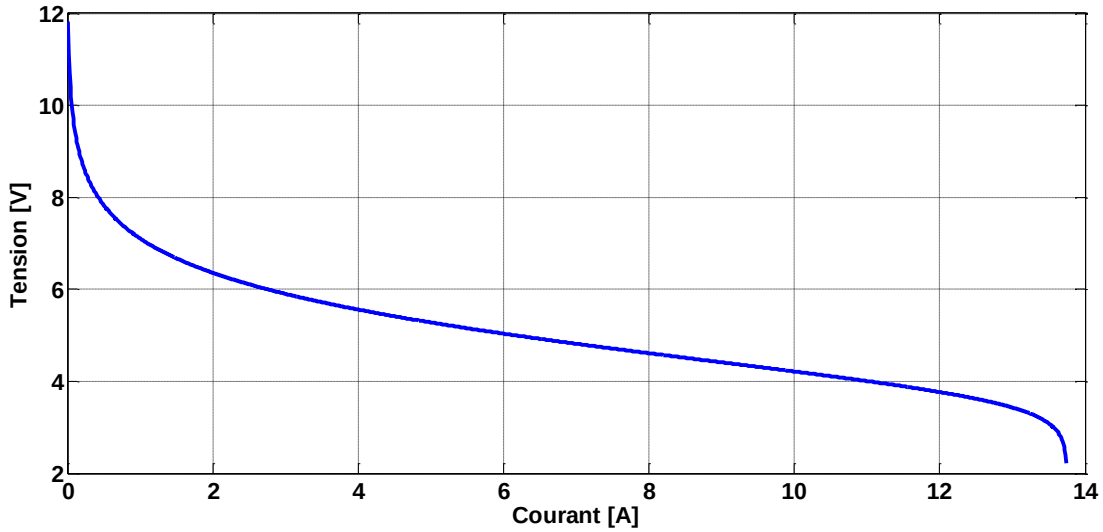


Figure II.13 : Caractéristique V = f(I) de la PEMFC.

Nous notons que le potentiel réel de la pile à combustible diminue avec l'augmentation du courant par rapport au potentiel de Nernst. Comme nous l'avons mentionné précédemment cette baisse est due aux trois polarisations (activation, ohmique, concentration).

À faibles valeurs du courants, la tension de la pile au démarrage chute brutalement du fait des pertes d'activation (V_{act}), puis cette baisse diminue jusqu'à ce qu'elle disparaisse presque. La deuxième baisse de tension, aux moyenne valeurs du courants, est due à la résistance interne de la pile (V_{ohm}) en raison de l'émergence d'une résistance au transit des ions dans l'électrolyte et de la résistance ohmique des électrodes, elle augmente linéairement avec l'augmentation du courant de charge. La troisième chute de tension (V_{con}), se produit à des courants élevés en raison de l'insuffisance des gaz de réaction atteignant les électrodes.

II.4.2 Caractéristique P-I de la PEMFC

La figure (II.14) montre la variation de la puissance en fonction du courant à T=30 °C et sous pression nominal.

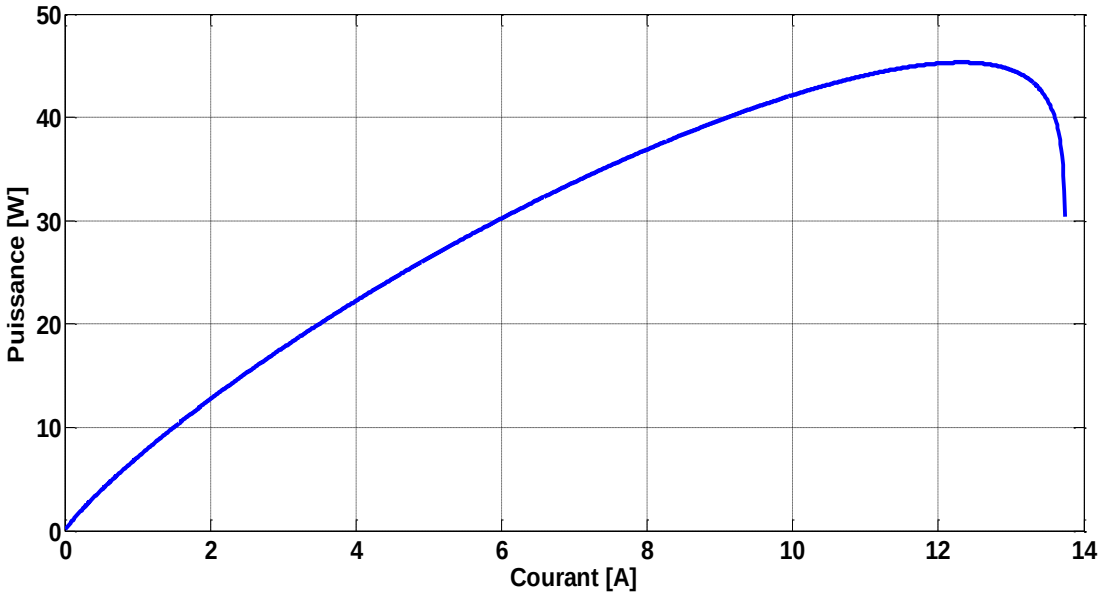


Figure II.14 : Caractéristique P = f(I) de la PEMFC.

Nous notons que la puissance augmente lorsque les valeurs de courant augmentent, puis diminue rapidement à des courants plus élevés, en raison de l'augmentation des polarisations affectant la tension de la pile. Habituellement, le point le plus élevé de la courbe n'est pas le point de fonctionnement de la pile, c'est-à-dire qu'il ne peut pas fonctionner à sa puissance maximale, car le rendement de la cellule est faible et la production d'eau augmente et la température augmente à ce point, ce qui rend difficile le pilotage de la pile.

II.4.3 L'influence de la température sur les caractéristiques électriques de la PEM

Parmi les paramètres que influée sur les caractéristiques électrique des PAC, la température, comme indiquée l'étude expérimental pour cette influence dans les figures suivant, pour différente valeur des températures (25 °C, 35 °C, 48 °C et 65 °C) à une pression constant (Pa=0.6 bar et Pc=0.9 bar).

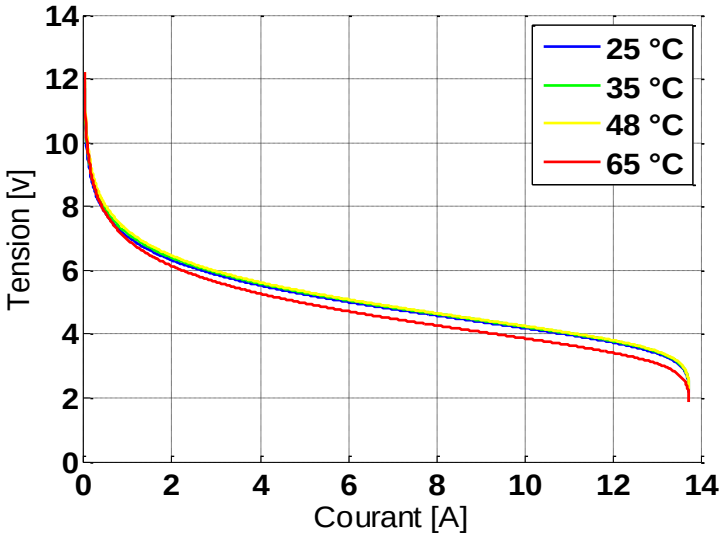


Figure II.15 : L'influence de la température sur les caractéristiques V-I de la PEMFC.

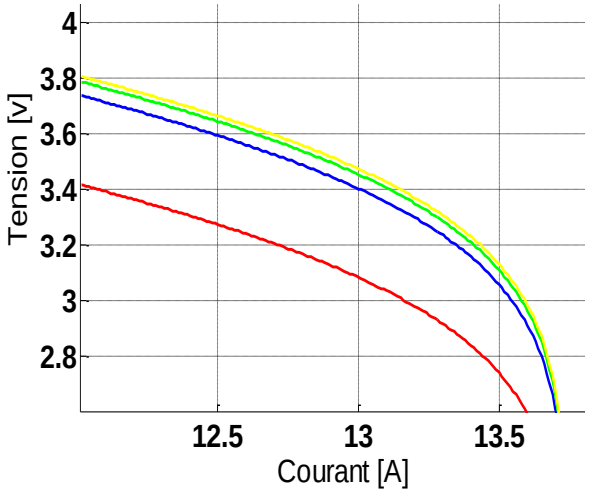


Figure II.16 : Zoom de la figure (II.15).

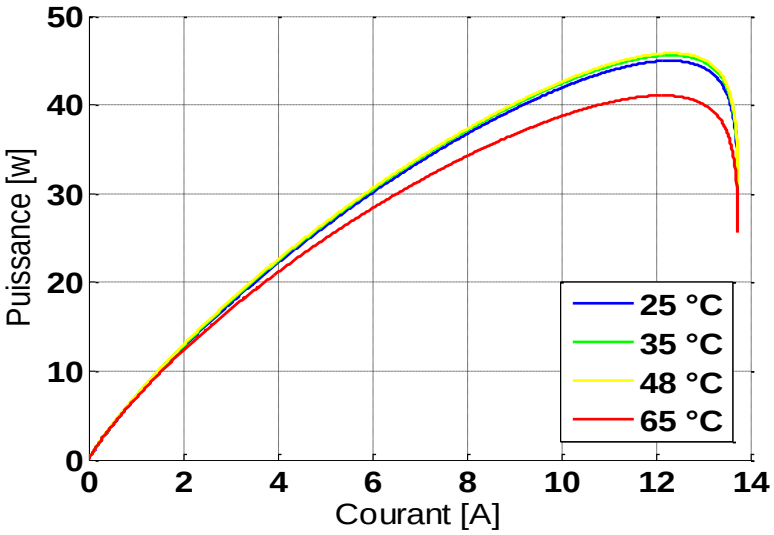


Figure II.17 : L'influence de la température sur les caractéristiques P-I de la PEMFC.

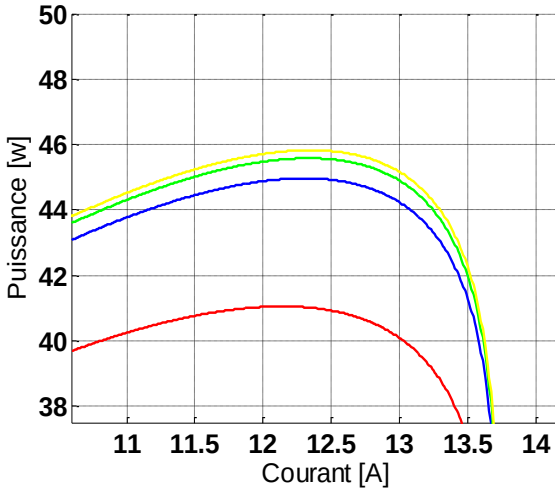


Figure II.18 : Zoom de la figure (II.17).

A travers les figures au-dessus, nous notons que lorsque la température augmente, les performances de la pile à combustible s'améliorent (la tension de la pile augmente ce qui entraîne une augmentation de la puissance électrique). Mais, cette augmentation doit se situer dans la température autorisée dans le feuillet de la pile, afin de ne pas provoquer la perte d'humidité nécessaire à la membrane de la pile. Lorsque des températures supérieures à 50 °C, nous remarquons un impact négatif sur les performances. Il est connu que la température accélère les réactions chimiques au sein de la pile. D'autre part, elle réduit les pertes d'activation parce que elle amortie sa non linéarité pour des valeurs élevées de courant ainsi que réduit les pertes ohmiques avec un impact direct sur la résistivité spécifique de la membrane, tout en gardant les pertes de concentration constantes.

II.4.4 L'influence de la pression sur les caractéristiques électriques de la PEM

La pression aussi influée sur les caractéristiques électrique des PAC, comme indiquée l'étude expérimental pour cette influence dans les figures (II.19) et (II.21), pour différente valeur des pressions (Pa=[0.6,0.9,1.2,1.7] bar et Pc=[0.9,1.2,1.5,2] bar) à une température constant 30°C.

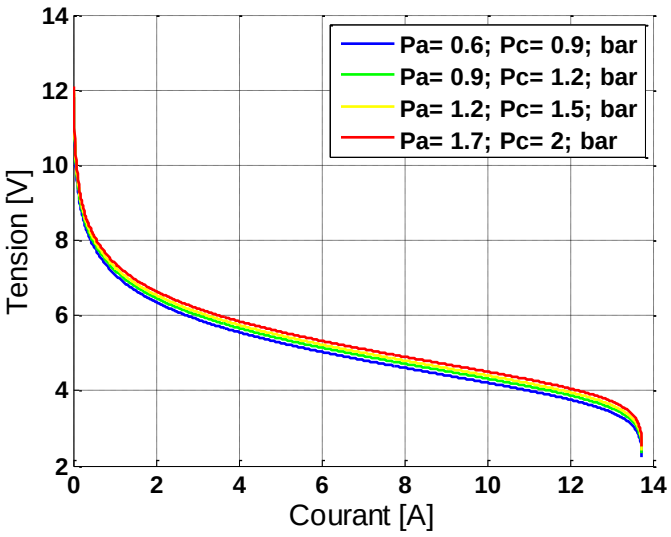


Figure II.19 : L'influence de la pression sur les caractéristiques V-I de la PEMFC.

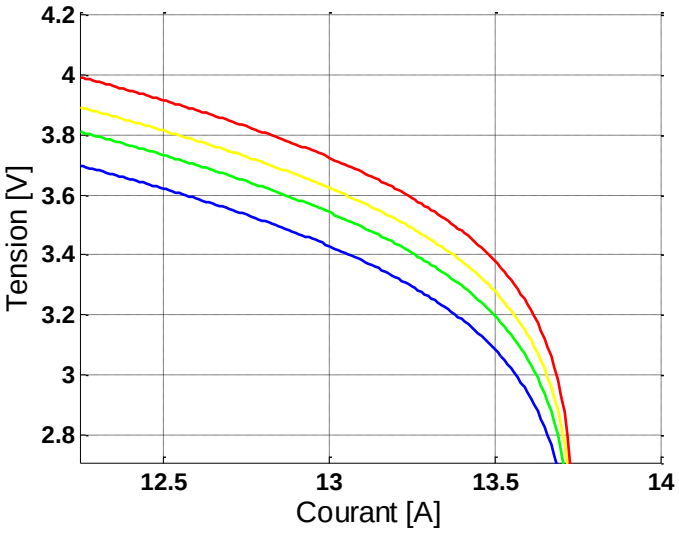


Figure II.20 : Zoom de la figure (II.19).

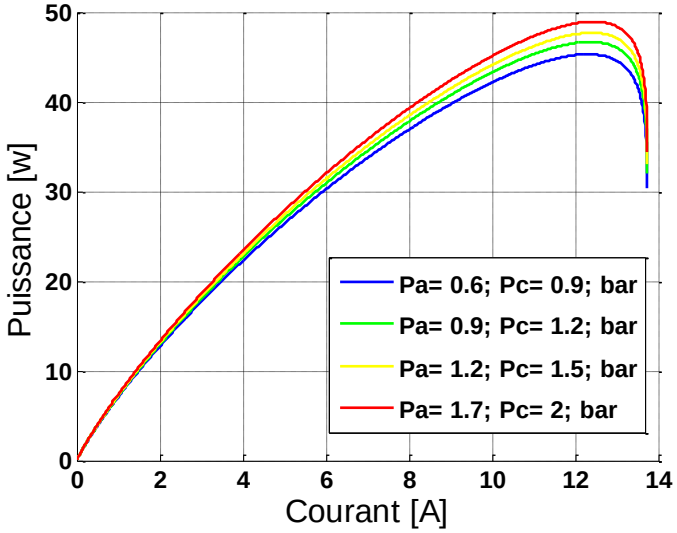


Figure II.21 : L'influence de la pression sur les caractéristiques P-I de la PEMFC.

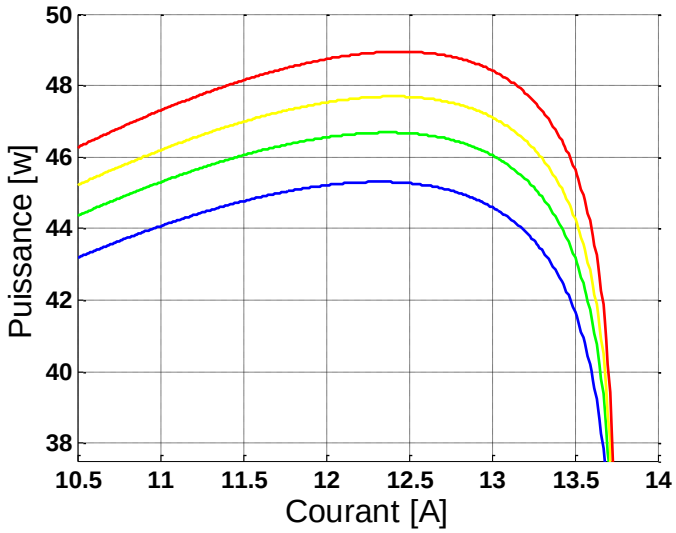


Figure II.22 : Zoom de la figure (II.21).

Nous notons que lorsque la pression augmente, les performances de la pile à combustible s'améliorent et la valeur de la puissance extraite augmente, mais il a une certaine valeur que doit être arrêté, pour que les composants de la cellule n'exposants pas en raison de la haute pression surtout la membrane que est très mince et susceptible d'être endommagé en raison d'une pression excessive. Aussi bien l'augmentation au-dessus de cette valeur entraîne une augmentation de la température, en plus d'une augmentation des valeurs des trois polarisations, ce qui conduit à une diminution du rendement de la pile.

II.4.5 La consommation d'hydrogène par la pile

La loi de Faraday permet de calculer la consommation d'hydrogène en termes de courant selon la relation suivante:

$$Q_{H_2} = \frac{N \times V_m}{Z \times F} \times I_{PAC} \qquad \text{(II. 14)}$$

Avec :

Q_{H_2}: Le débit d'hydrogène [ml/min].

N : Le nombre de couches (couples anode/cathode) de la pile égal à 10.

V_m : Le volume molaire de H2 égal à 22.4 [l/mol].

Z : Le nombre d'électrons impliqués dans la réaction d'une molécule de dihydrogène égal à 2.

F : Constante de Faraday 96368 [C/mol] ou [A.S/mol].

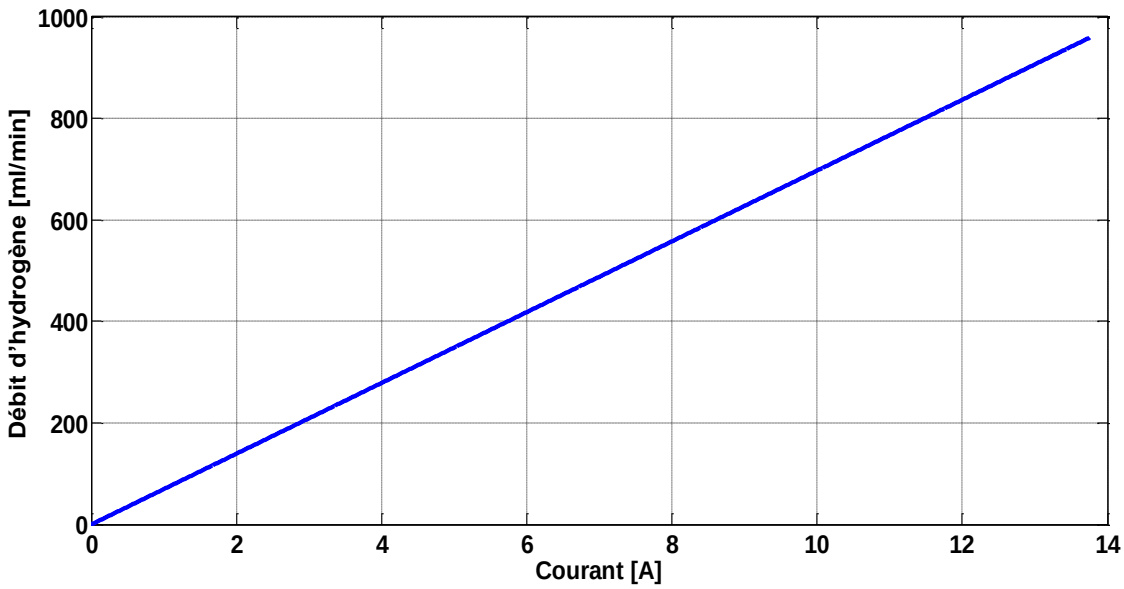


Figure II.23 : Caractéristique de consommation d'hydrogène par la PEMFC.

La figure (II.23) montre que le débit d'hydrogène varie linéairement avec le courant, c'est-à-dire que plus la charge est'élevée, plus la consommation d'hydrogène.

II.4.6 Le rendement de la pile à combustible

En général, le rendement défini comme le rapport entre le résultat obtenu et le résultat consommé. Alors le rendement de la pile à combustible (η_{PAC}) est le rapport entre la puissance électrique produite (P_{PAC}) etla puissance chimique absorbé (P_{abs}), elle est donnée par:

$$\eta_{PAC} = \frac{P_{PAC}}{P_{abs}} \qquad (II.15)$$

$$\eta_{PAC} = \frac{V_{PAC} \times I_{PAC}}{Q_{H_2} \times PCI} \qquad (II.16)$$

Avec :

P_{PAC} : La puissance produite (électrique).

P_{abs} : La puissance absorbée (chimique).

PCI : Le pouvoir calorifique inférieur égale 10 800 KJ/Nm^3.

II.5 Conclusion

Les caractéristiques électriques distinguent chaque pile à combustible de l'autre. Dans ce chapitre, nous avons appris les équations mathématiques que caractérisent les piles à combustibles PEM ainsi que les différentes caractéristiques électriques et dynamiques. Ensuite, simuler les résultats et les valeurs obtenus dans l'environnement MATLAB pour l'obtention des courbes de la spécification pour chaque état. Ces courbes donnent une image plus claire de la compréhension de la performance des piles à combustible de sorte que les meilleures conditions doivent être remplies pour que ces cellules puissent travailler au meilleur rendement.

CHAPITRE III

Identification des paramètres de la pile PEM par les méthodes méta-heuristiques

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent on a donné une description sur le modèle d'Amphlett qui peut simuler le comportement des piles à combustibles. En effet, ce modèle est général, et peut être utilisé pour estimer le comportement des piles à combustibles de petites puissances ainsi que grandes puissances.

Ainsi, pour estimer la caractéristique tension-courant d'une pile à combustible spécifique, le concepteur doive tous d'abord identifier les paramètres inconnus propres de la pile désiré à partir les données expérimentaux. Cependant, cette procédure n'est pas facile dus à la non linéarité et le nombre élevé des paramètres inconnus inclus dans le modèle.

Pour adresser ce problème, les chercheurs proposent nombreux de méthodes pour identifier les paramètres indéfinis de ce modèle.

Ces méthodes peuvent être classifiées en deux catégories : méthodes conventionnelles déterministes et méthodes à base de l'optimisation méta-heuristiques. Les méthodes déterministes telles que algorithme de G-R-G **[60]**, fractional-order **[61]**, et impedance-spectroscopy **[62]**, ont ses limitations concernant le calcule massive et la précision faible génère par ces derniers. D'autre coté, méthodes les méta-heuristiques sont adoptées dans ce contexte pour surmonter les problèmes des méthodes déterministes. Elles sont des techniques de recherche stochastiques, basées sur un groupe des individus ou par fois dite population.

Une revue dans la littérature a illustré qui les méthodes méta-heuristiques ont été appliquées dans nombreux de problèmes d'ingéniorat tels que, la maximisation de puissance des panneaux photovoltaïques **[63]**, identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque **[64]**, dimensionnement de nombres optimale des sources dans une installation électriques **[65]**, applications de traitement d'image **[66]**, et le contrôle des systèmes électriques **[67]**.

Cette étude adresse une autre application des méthodes méta heuristiques. Le but est de développé un modèle mathématique de pile à combustible fiable et plus précise. De plus, l'idée est de minimiser l'erreur entre les points tension-courant expérimentaux et estimés et extraire les paramètres optimaux des piles à combustibles.

Deux méthodes récemment développées appelés évolution différentielle (ED) et optimisation par essaims des particules (PSO) ont été utilisées pour extraire les paramètres optimaux de la pile à combustible. Pour démontrer l'efficacité des méthodes proposées, une pile

PEM d'une puissance maximale de 50W a été utilisée. Les résultats finales sont très encourageantes, elles démontent que les méthodes proposées assure un bon accordance entre les points tension-courant expérimentaux et estimés. Dans le reste de chapier, on va expliquer le principe de fonctionnement des deux méthodes d'optimisation proposées, on suite on va construire la fonction objectif de problème. On va également illustre les étapes expérimentaux nécessaires pour faire l'identification.

III.2 Les méthodes d'optimisation méta heuristiques

La méta-heuristique est une branche de l'optimisation et mathématiques appliquées liées aux algorithmes et la théorie de calcul stochastique. Ces méthodes sont principalement utilisés pour minimiser ou maximiser une fonction donnée appelé fonction objectif.

Dans les dernières 30 années, on a vu un développement remarquable dans le domaine d'optimisation par les méthodes bio-inespérées. La plupart des méthodes méta-heuristiques simule les métaphores naturelles (par exemple, colonie de fourmis, essaim de particules, système immunitaire, colonie d'abeilles et essaim de guêpes) pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes dans différents domaines de recherche et industries **[68]**.

Il existe nombreux méthodes développées dans littérature pour résoudre les problèmes d'optimisation tels que PSO **[69]**, ED **[64]**, AG **[70]**, et ABC **[71]**. Dans ce chapitre nous allons intéresser à appliquer les deux méthodes méta-heuristiques PSO et ED pour optimiser les paramètres inconnus de modèle de pile à combustible.

III.2.1 Principes de fonctionnement des méthodes méta-heuristiques sélectionnés

Dans les problèmes d'ingéniorat il est difficile d'utilisé les méthodes d'optimisations conventionnels basées sur les conditions initiales. Car ces dernières provoquent le risque d'être stagnées dans une solution non désiré dite le optimum locale. Ces méthodes demande un temps de calcule très élevé, sans mentionné la limitions au niveau de la précision généré. Dans l'autre côté, les méthodes stochastiques sont venues pour résoudre les problèmes des méthodes conventionnelles. Elles sont des approches simples, efficaces, et qui ont une grande capacité de localiser l'optimum globale et extraire des solutions de haute qualité.

A cause de leurs avantages, les méthodes d'optimisation méta heuristiques ont été utilisées dans des nombres applications industriels tel que identification des paramètres des systèmes, contrôle des processus, dimensionnement des systèmes **[72]**. Dans ce chapitre nous

allons intéresser à utiliser les méthodes méta-heuristiques, en particulaire PSO et ED afin de d'extraire les paramètres optimales da la PAC.

III.2.1.1 Optimisation par essaims particulaires (PSO)

Optimisation par essaims particulaires (appelé en Anglais particle swarm optimization ou PSO) est une méthode de recherche stochastique simule le comportement des troupeaux d'oiseaux. Elle a été proposée en 1993 par les scientifiques **Russell Eberhart** et **James Kennedy [69]**.

PSO fonctionne à base d'une population appelée essaim (où particules) qui sont les solutions possibles de problème en effet. PSO une méthode itérative simple à appliquer, les particules dans la méthode se déplacent dans chaque itération prenant en compte leur meilleure position $\mathbf{G_{best}}$ (position globale) et la meilleure position de son voisinage $\mathbf{P_{best}}$ (position meilleur).Le mouvement des particules vers la solution optimale peut être obtenir par la formule suivante **[73]**:

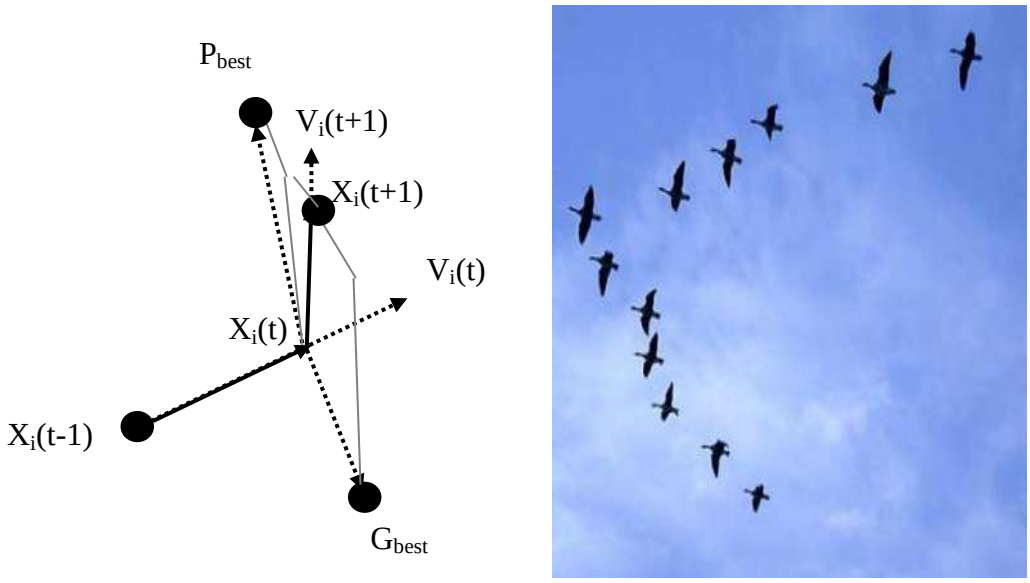


Figure III.1: Mouvement de particules.

$$X_i(\mathrm{t}+1) = X_i(\mathrm{t}) + V_i(\mathrm{t}+1) \qquad \text{(III. 1)}$$

Où V et vitesse des particules donner par :

$$V_i(\mathrm{t}+1) = \omega \times V_i(\mathrm{t}) + \mathrm{r1} \times \mathrm{C1} \times \left(P_{best}(\mathrm{t}) - \mathrm{X}(\mathrm{t})\right) + \mathrm{r2} \times \mathrm{C2} \times \left(G_{best} - X_i(\mathrm{t})\right) \qquad \text{(III. 2)}$$

ω est le moment d'inertie (ω=0.4), r1 et r2 sont de nombres aléatoire dans [0,1]. C1 et C2 sont des coefficients constances (C1=C2=1.5).

Le pseudo code de l'algorithme PSO est donner ci-dessous:

Algorithme 1: Pseudo-code de minimisation par PSO **[74]**.

1: Initialiser le population (x) aléatoirement dans l'espace de research (1, 2, ...NP)

2: Initialiser le population (Pbest) de meilleur position aléatoirement dans l'espace de research (1, 2, ...NP)

3:Initialiser les paramètres de contrôles C1=C2=1.5 et ω=0.4
4:Calculer la fonction objectif de tout les particules.
5:Mettez Xbest comme le position correspondent au meilleur solution (minimum)**.**

6:It=1

7:Max_It=1000

8: While (It<Max_It)
9:For(pour chqaueparticule)

10:If1 [FO (X(t)) <FO (Pbest(t))]

11: MetterPbest(t)= X(t)

12: End if1

13: If2 [FO (Pbest(t)) <FO (Gbest)]

14: Metter Gbest=Pbest(t)

15: End if2

16: End for

17: Ajuster l'agent actuel

18: Si un agent sort de l'espace de recherche, rectifiez-le

19: It=It+1

20: End While

21: Returner à Gbest

III.2.1.2 Evolution Différentiel (ED)

ED font partie d'une famille de méthodes de recherches stochastiques appelées méthodes évolutionnistes, elle a été proposée en 1997 par **Storn [75].** ED est similaire de algorithme génétique, mais les opératoires de mutation et croisement sont différents. La méthode améliore son individus aléatoirement, on appliquant la mutation et le croisement de manière séquentielle. Lorsque la solution désiré est atteinte le processus de recherche s'arrêt. Les étapes nécessaires pour optimiser un system par ED sont :

- **Initialisation**

Pour commencer le processus de l'optimisation, il faut produire d'individus aléatoirement dans l'espace de recherche. La population peut être produite on utilise l'équation suivant pour chaque variable (Xi).

$$X_i(t) = X_{LB} + rand(0,1) \times (X_{UB} - X_{LB}) \quad \text{(III. 3)}$$

Où Xi est le variable i^{éme} de system, rand (0,1) est un nombre numérique dans l'intervalle [0,1]. X_{UB} et X_{LB} sont les valeurs supérieures et inférieures de problème respectivement.

- **Mutation**

Dans cette étape, un autre vecteur est généré en utilisant le vecteur initial Xi. Dans la littérature, le vecteur actuel (Xi) est appelé le cible ou par vois le vecteur parent. D'autre part, le vecteur construit Vi est appelé vecteur donneur, les éléments de Vi sont crées aléatoirement on utilisent les éléments de Xi et le facteur de la mutation F comme l'équation(III. 4) illuter:

$$V_i = X_{rand1} + F \times \{X_{rand2} + X_{rand3}\} \quad \text{(III. 4)}$$

X_{rand1}, X_{rand2}et X_{rand3} sont des éléments de population Xi sélectionné aléatoirement. F est le facteur de mutation (F=0.8) **[64]**.

- **Croisement**

Dans cette étape on mixe les éléments de vecteur Xi et Vi pour génère une nouvelle génération selon un algorithme donner par l'équation (III.5). L'opération de croisement est très important, parce que elle nous permettre de explorer le domaine de recherche de manier efficace ainsi que d'éviter la convergence vers l'optimum locale. Le croisement est effectué par les équations suivantes:

$$U_i(\text{t})=\begin{cases} V_i(t) si \ \ (rand \ \leq CRout = t_{rand}) \\ X_i(t) ailleur \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

Où CR est le parentage de croisement dans [0,1], et t_{rand} est nombre aléatoire ∈[1,2,..NP]. Le problème majeur dans le DE conventionnel est la génération des valeurs hors l'espace de recherche. Pour éviter ce problème, une fonction de pénalité est utilisée pour assure que les valeurs des paramètres se situent dans la plage autorisée après recombinaison **[64,76]**.

$$V_i(\text{t}) = X_{LB} + rand(0,1) \times (X_{UB} - X_{LB}) \text{ Si } \ V_i(\text{t}) > X_{UB} \text{ ou } V_i(\text{t}) < X_{LB} \quad \text{(III.6)}$$

Algorithme 2: Pseudo-code de minimisation par ED **[64]**.

1: Initialiser le population (X) aléatoirement dans l'espace de research (1, 2, ...NP)

2: Initialiser les paramètres de contrôles F=0.8 et CR=0.9

3: Mettez Gbest comme le moyen de population comme Gbest=mean (X).

4:It=1

5:Max_It=1000

6: While (It<Max_It)

7:For (pour chqaueparticule)

8: Calculer $V(t) = X_{rand1} + F \times \{X_{rand2} + X_{rand3}\}$

9: If1 ($V(t) < X_{LB}$)

10: $V(t) = X_{LB} + rand(0,1) \times (X_{UB} - X_{LB})$

11: End if 1

12: If2 ($V(t) > X_{UB}$)

13: $V(t) = X_{UB} - rand(0,1) \times (X_{UB} - X_{LB})$

14: End if 2

15: If3($rand(0,1) \leq CR$ ou $t = t_{rand}$ **)**

16: U(t)=V(t)

17: Else

18: U(t)=X(t)

19: End if3

20: If4 { FO [U(t)] < FO [X(t)] }

21: X(t)=U(t)

22: End4

23 : End for

24: Xmoy=mean (X) % (valeur moyenne de population X)

25: If5 { FO[Xmoy] <FO[Gbest] }

26: Gbest=Xmoy

27: End if 5

28: It=It+1

29: End While

30: Returner à Gbest

III.3 Application des méthodes méta-heuristiques sur d'identification des paramètres de modèle de PAC.

Dans le modèle de PAC il y a 8 paramètres qui fautent être identifiés *i.e.* ξ_1,ξ_2,ξ_3,ξ_4,b,λ, R_c et J_{max}. Pour extraire ces dernières, le chercheur doit construire une fonction objectif afin d'être minimisé. Les coefficients paramétriques ξ_1,ξ_2,ξ_3 et $\xi_4$influencés sur la surtension d'activation selon la relation (II.7), λ *et* R_c influencés sur la surtension ohmiqueselon la relation (II.9), b et J_{max} influencés sur la surtension de concentration selon la relation (II.12). Par conséquence la somme de ces surtensions influencés sur la tension de la pile (V_{PAC}) et donne une tension peu différent par rapport à la tension expérimental.

III.3.1 La fonction objectif (FO)

Le modèle mathématique est dit précise si les points courant-tension I-V expérimentals et simulées sont presque identiques. Généralement, l'erreur SSE entre le données mentionnées (expérimental/simulées) est considéré comme une fonction objectif. Maintenant, le but final est de ajuster les paramètres inconnus de tell manière la fonction SSE (sum square error) est bien minimisée.

$$\text{SSE } (I,V,\xi_1,\xi_2,\xi_3,\xi_4,b,\lambda,R_c,J_{max}) = \sum_{i=1}^{N}\left[V_{\exp}(i) - V_{est}(i)\right]^2 \quad \text{(III.7)}$$

$$\text{FO} = \text{minimise (SSE)} \quad \text{(III.8)}$$

Les paramètres inconnus sont limités par les valeurs suivantes.

Tableau III.1 : Les limites supérieures et inférieures des paramètres **[52]**.

Paramètre	Limite inférieur	Limite supérieur
ξ_1 (-)	-1.1997	-0.8532
ξ_2 (-)	1.00E-3	5.00E-3
ξ_3 (-)	3.60E-5	9.80E-5
ξ_4 (-)	-26.00E-4	-9.54E-4
λ (-)	13.00	23.00
Rc(Ω)	0.10E-3	0.80E-3
b (V)	0.0136	0.50
Jmax (A)	0.40	0.50

III.3.2 Essais expérimentaux

III.3.2.1 Plateforme de la caractérisation expérimentale

Pour implémenter ces algorithmes d'optimisation, un certain nombre d'expériences doivent être réalisées au laboratoire tout d'abord. Les points tension-courant expérimentaux ont été obtenus à partir de la plate-forme de test Heliocentris-FC50, installée au niveau du labo de génie électrique.

L'expérience a été menée à une température moyenne interne (32 °C). Le système est composé d'une pile à combustible PEMFC de 50 watts inclus dans un banc d'essais composé de : Une bouteille d'hydrogène, vanne de régulation de pression, charge R variable programmée comme un signal de rampe pour extraire les points de tension et de courant requis et system d'acquisition des données. Comme illustre la figure ci-dessous.

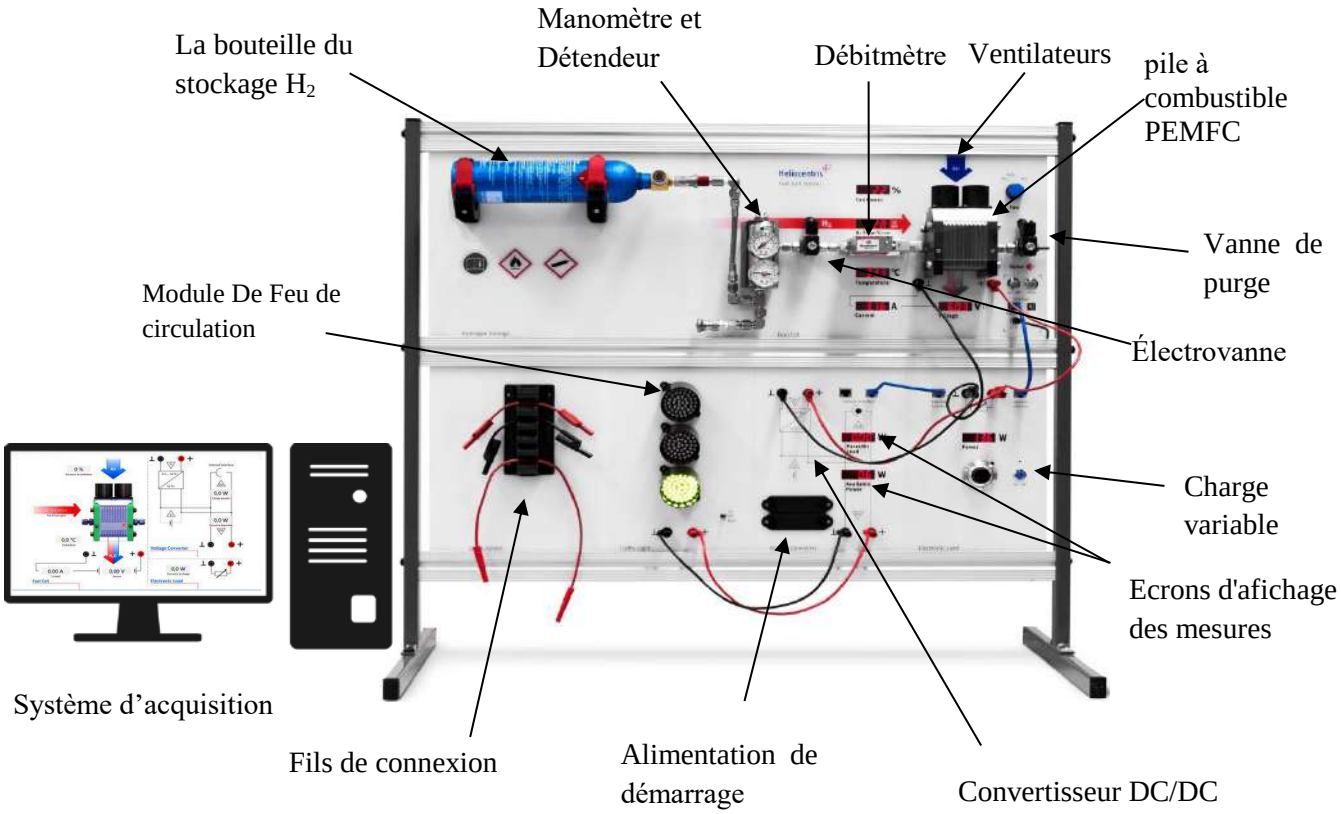


Figure III.2 : Maquette d'expérimentations.

De plus, un programme dans environnement MATLAB a été développé pour calculer les paramètres optimaux. Les courbes caractéristiques ont été toujours mesurées dans une température moyenne interne (32 °C).

Les spécifications du PAC utilisés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Caractéristiques électriques des piles à combustible modèle de «Heliocentris» **[77,78]**.

Paramètre	Description	Valeur
ξ_1	coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de PAC	-1.1883
ξ_2		0.0026
ξ_3		3.8067E-5
ξ_4		-3.1912E-4
Λ	La teneur en eau dans la membrane	10.500
b	La constante électrochimie et donné par la relation suivant	0.0263 (V)
R_c	La résistance équivalente de contact à la conduction des électrons	3.34E-4(Ω)
J_{max}	La densité de courant maximale	0.5500 (A/cm^2)
Pa	La pression de l'hydrogène à l'anode	0.6 (bar)
n	Nombre des cellules élémentaires de la pile	10
A	La surface active de la pile en	25 (cm^2)
P	La puissance électrique	50 (W)
l	L'épaisseur de la membrane	27 (μm)
I_n	Le courant nominal	8 (A)
V_n	La tension nominale	5 (V)
V_O	La tension de circuit ouvert	9 (V)
RH_a	L'humidité relative à l'anode	1
RH_c	L'humidité relative à la cathode.	1

III.4 Résultats et discussion

III.4.1 Caractérisation V-I

Il convient de rappeler qu'il y a 8 paramètres inconnus qui doivent être optimisés. Les paramètres extraits sont réutilisés dans le modèle pour estimer la courbe V-I dans une température moyenne interne (T = 32 °C). La figure (III.3) représente la courbes V-I estimées superposés avec les données mesurées. A partir de la dernière figure, on peut observer que toutes les méthodes montrent un bon accordance entre les valeurs mesurés et estimés. Cependant, certaines différences peuvent être détectées lorsqu'on grandit plus l'image. Une vue plus rapprochée sur la figure (III.4), nous pouvons voir que la méthode PSO atteint la plus grande précision, ce qui signifie que l'optimum globale est bien exploré.

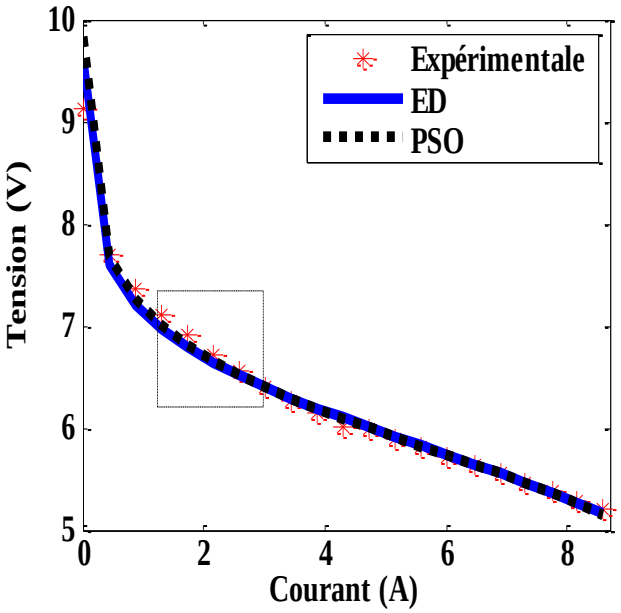


Figure III.3 : La courbe V-I de PAC.

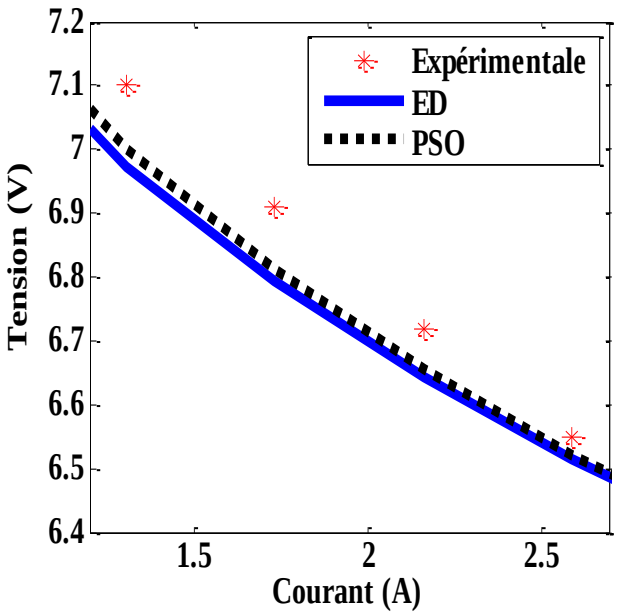


Figure III.4 : Zoom de la partie sélectionnée.

Les indicateurs statistiques en termes de RMSE et MAE ont été utilisés pour estimer la déviation des résultats simulés par rapport aux données expérimentaux. Les résultats du tableau (III.3) valident ces observations, le PSO a été classé dans la premier position avec erreur de SSE=0.3188V. De plus, ED a été classé en deuxième position avec une erreur de SSE=0.5765V.

$$\text{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[V_{\exp}(i)-V_{est}(i)\right]^2/N} \qquad \text{(III.9)}$$

$$\text{MAE}=\sum_{i=1}^{N}\left(\left\|V_{\exp}(i)-V_{est}(i)\right\|\right)/N \qquad \text{(III.10)}$$

Le raison derrière l'obtention de bons résultats par PSO est que les mécanismes d'exploration et d'exploitation de la méthode sont très efficaces, ce que permettre à la méthode d'extraire des solutions de haute qualité. Par contre, la méthode ED ne peut pas effectuer une bonne exploration et exploitation, ce qui se traduit par l'exploration de résultats de mauvaise qualité. De plus, pour sélectionner la méthode d'optimisation appropriée pour le processus de l'identification, il est extrêmement important d'évaluer la rapidité de la méthode proposé. La section suivante est consacrée à l'étude de la vitesse de convergence de deux méthodes PSO et ED.

Tableau III.3: Les paramètres optimaux de PAC helieocentris-50W.

Paramètre/méthode	PSO	ED
ξ_1 (-)	-1.1109	-1.0862
ξ_2 (-)	0.0027	0.0025
ξ_3 (-)	6.1093E-5	5.1012E-5
ξ_4 (-)	-1.7084E-4	-1.8581E-4
λ (-)	15.7734	17.8315
Rc(Ω)	7.9707E-4	7.9772E-4
b (V)	0.0717	0.0589
Jmax (A)	0.4989	0.4682
SSE	0.3188	0.5765
MAE	0.0680	0.0710
RMSE	0.1232	0.1657
Itérations consumes	59	83

III.4.2 Convergences des méthodes PSO et ED

La figure (III.5) représente l'évolution de la fonction objectif en fonction de nombre d'itérations. A partir de figure (III.6), il est apparent que la méthode PSO a montré une

convergence rapide par rapport à l'autre approche. La solution souhaitée a été achevé après quelle que itérations (59^{éme}). De plus, la méthode ED a montré un certain retard après sa stabilisation, la minimum a été atteinte à la 83^{éme} itération comme une deuxième place. Le raison d'avoir des bons résultats par PSO est que la méthode génère des solutions avec légèreté, ce qui rend l'ajustement de la population vers la solution optimale très rapide.

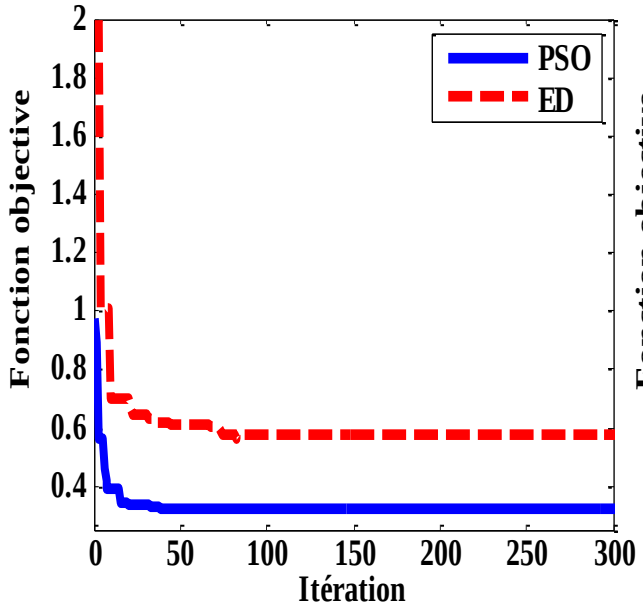


Figure III.5 : Courbes de la convergence.

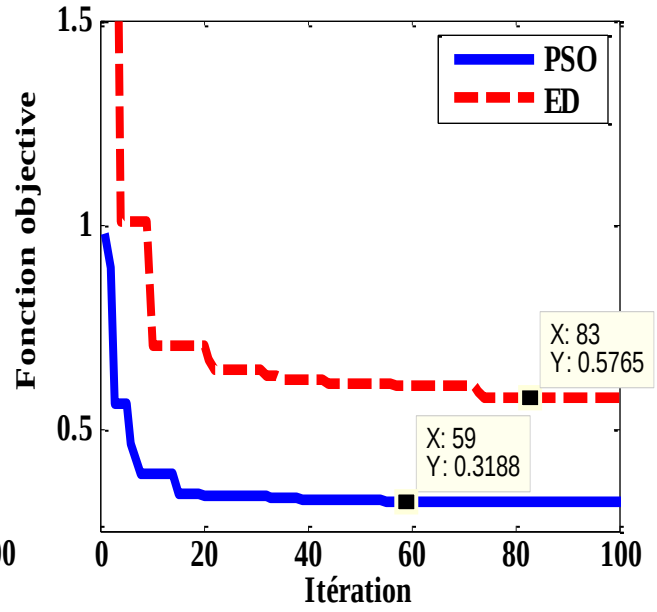


Figure III.6 : Zoom des courbes de la convergence.

Finalement, à partir les résultats encourageantes obtenir dans cette étude on peut conclure que les méthodes heuristiques peuvent être classées comme l'un des algorithmes les plus puissantes utilisé dans les problèmes extraction des paramètres des cellules PAC.

III.5 Conclusion

L'identification précise des paramètres des PAC a un impact significatif sur l'estimation de performance de générateur. Pour cette raison, la demande de plus de précision est toujours requise.

Dans cette étude, deux algorithmes d'optimisation (appelées PSO et DE) basés sur l'intelligence artificiel ont été appliquées pour extraire les paramètres optimales de modèle de générateur. Les résultats obtenus sont très encourageants. L'erreur minimum été bien achevé, et

l'accordance entre les valeurs mesurés et simulés été bien démontré. Les deux méthodes adoptées ont montrent une bonne caractéristique de convergence.

Finalement, PSO et ED montrent une haute capacité pour modéliser le comportement quasi exact des PACs, non seulement dans des conditions nominales mais également dans des conditions différentes.

Conclusion générale

Conclusion générale

La modélisation précise des piles à combustible PEM est une étape important pour prédire la puissance réelle générée par le générateur. La précision du modèle est liée à la précision des paramètres inconnus du modèle. Les méthodes méta-heuristiques ont été largement utilisées dans ce contexte. L'objectif globale du ce travail été de développer un modèle à haute précision pour une pile à combustible PEM de puissance maximale 50 W. L'idée principale a été d'extraire les paramètres inconnus optimaux de la pile par la minimisation d'erreur entre les données expérimentales et estimés de tension. Les méthodes d'optimisation basées sur la recherche stochastique (PSO et ED en particulaire) ont été employées dans cette étude pour achever ce but. Les résultats principaux obtenus dans ce travail sont organisées comme suite :

- Les paramètres optimaux de la pile à combustible Heliocentris-FC50 ont été identifiés.
- L'erreur minimale entre la courbe V-I (tension-courant) expérimental et estimé a été obtenue.
- Les indicateurs statistiques requis ont été calculés. L'erreur calculée par PSO et ED étaient 0.3188 V et 0.5765 V respectivement.
- PSO a montré un bon potentiel de convergence lors de l'extraction des paramètres optimaux. PSO a été stabilisé au solution optimale après 59 itérations, tandis que ED a été stabilisé après 83 itérations.
- En conclusion, on peut déclarer que les méthodes d'optimisation méta heuristiques sont des techniques très efficaces qui peuvent être appliquées avec succès dans la processus de modélisation optimale de la pile à combustible.

Références bibliographiques

[1] El-Hay EA, El-Hameed MA, El-Fergany AA, ‘‘Optimized parameters of SOFC for steady state and transient simulations using interior search algorithm’’, Energy: 166:451-461, https://doi.org/10.1016/j.energy, 2018.10.03.

[2] Saleh IMM, Ali R, Zhang H, ‘‘Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on horizon fuel cell stack’’, J Mod Power Syst Clean Energy: 4:668-679, https://doi.org/10.1007/s40565-016-0196-5, 2016.

[3] Liu D, Xia S, Tang H, et al, ‘‘Parameter optimization of PEMFC stack under steady working condition using orthogonal experimental design’’, Int J Energy Res: 43:2571-2582, https://doi.org/10.1002/er.4131, 2019.

[4] Kim YS, Lee KS, ‘‘Fuel cell membrane characterizations’’, Polymer Rev: 55:330-370, https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1011275, 2015.

[5] Yang S, Chellali R, Lu X, Li L, Bo C, ‘‘Modeling and optimization for proton exchange membrane fuel cell stack using aging and challenging P systems based optimization algorithm’’, Energy: 109:569-577, https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.093, 2016.

[6] Kandidayeni M, Macias A, Khalatbarisoltani A, Boulon L, Kelouwani S, ‘‘Benchmark of proton exchange membrane fuel cell parameters extraction with metaheuristic optimization algorithms’’, Energy: 183:912-925, https://doi.org/10.1016/jenergy, 15.06.2019.

[7] El-Hay EA, El-Hameed MA, El-Fergany AA,‘‘Steady-state and dynamic models of solid oxide fuel cells based on satin bowerbird optimizer’’, Int J Hydrogen Energy: 43:14751-14761, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene, 03.06.2018.

[8] Voottipruex K, Sangswang A, Naetiladdanon S, Mujjalinvimut E, Wongyoa N,‘‘PEM fuel cell emulator based on dynamic model with relative humidity calculation’’, In: 14th Inter. Conf. on Elect. Eng. Electronics, Comp, Telecom. and Info. Techn.(ECTI-CON). Phuket, Thailand: IEEE:27-30 10.1109/ ECTICon.2017.8096291, June 2017.

[9] Priya K, Babu TS, Balasubramanian K, Kumar KS, Rajasekar N,‘‘A novel approach for fuel cell parameter estimation using simple genetic algorithm’’, Sustain Energy Techn Assess: 12:46-52, https://doi.org/10.1016/j.seta, 01.09.2015.

[10] Zhang L, Wang N, ‘‘An adaptive RNA genetic algorithm for modeling of proton exchange membrane fuel cells’’, Int J Hydrogen Energy: 2013;38:219-228. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene , 26.10.2012.

[11] Grondin-Perez B, Roche S, Lebreton CL, Benne M, Damour C, Kadjo JA, ‘‘Mechanistic model versus artificial neural network model of a single-cell PEMFC’’, Engineering;6:418-426, https://doi.org/10.4236/eng, 2014.

[12] Chang W, ‘‘Equivalent circuit parameters estimation for PEM fuel cell using RBF neural network and enhanced particle swarm optimization’’, Math ProblEng: 2013:67268, https://doi.org/10.1155/2013/672681, 2013.

[13] Cheng J, Zhang G, ‘‘Parameter fitting of PEMFC models based on adaptive differential evolution’’, Electr Power Energy Syst;62:189-198, https://doi.org/10.1016/j.ijepes, 04.04.2014.

[14] Vincent Reguillet, ‘‘Caractérisation d'un système pile à combustible en vue de garantir son démarrage et fonctionnement à température ambiante négative’’, Thèse de Doctorat de l’université de Franche-Comté, 24 juin 2013.

[15] phatiphat Thounthong ‘‘Conception d’une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs’’, Thèse de Doctorat de l’institut national polytechnique de lorraine, le 9 décembre 2005.

[16] Boudellal, Méziane, ‘‘La pile à combustible structure, fonctionnement, applications’’, DUNOD, 2007.

[17] Boudellal, Méziane, ‘‘La pile à combustible: L’hydrogène et ses applications’’, 2e édition, DUNOD 2007,2012.

[18] James Larminie and Andrew Dicks, ‘‘Fuel Cell Systems Explained’’, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-84857-X, 2003.

[19] Séverine Busquet, ‘‘Etude d’un système autonome de production d’énergie couplant un champ photovoltaïque un électrolyseur et un pile à combustible réalisation d’un banc d’essai et modélisation’’, Thèse de Doctorat de l’Ecole des Mines de Paris, 15 décembre 2003.

[20] Ben messaud Muhammed Tarik, ‘‘Système d’énergie hybride YSTÈME PV-SOFC Étude de cas de réalisation stationnaire à l’USTO’’, Thèse de Doctorat de l’université de Mohamed Boudiaf ORAN, 03.07.2012.

[21] ‘‘pile à combustible stationnaire’’, Rapport d’étude n° DRA-17-156712-00653A, Contexte règlementaire et net normatif international et national risques potentiels, 31.01.2017.

[22] P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, “Conception et réalisation d'un convertisseur statique basse tension pour pile à combustible de type PEM”, EPF’04, Toulouse, France, 15-17 Septembre 2004.

[23] Site web:http://voitures-propres.e-monsite.com/pages/content/ii-la-voiture-a-pile-a-combustible/structure-de-la-pile-a-combustible.html

[24] Mohamad Safa, ‘‘Modélisation réduite de la pile à combustible en vue de la surveillance et du diagnostic par spectroscopie d’impédance’’, Thèse de Doctorat, 24/10/2012.

[25] Azzi Halim, ‘‘Etude et modélisation d’une pile à combustible’’, Mémoire de Magister,

Université de Bejaia, 09.05.2016.

[26] AFHYPAC, Mémento de l'Hydrogène, ''LES PILES A COMBUSTIBLE (PAC) '', FICHE 5.2.1, février 2018.

[27] Sylvaine Pique, ''Pile à combustible stationnaire'', RAPPORT N° DRA-17-156712-00653A, 31.01.2017.

[28] Mounir Sahli, ''étude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible '', le diplome de magister, universte mentouri de constantine, 17/10/2010.

[29] AFHYPAC, Mémento de l'Hydrogène, ''La pile MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) '', FICHE 5.2.5, avril 2019.

[30] Bouras Kheira et Moussouni Leila, ''Modélisation de systèmes réversible de types électrolyseurs et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïque'', Mémoire de Master, 03/07/2017.

[31] Site web: http://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-3976/7108_read-49510/

[32] Site web: http://www.automobile-propre.com/voiture-hydrogene/

[33] Site web: http://media.toyota-live-un-autobus-a-pile-a-combustible-au-gouvernement-metropolitain-de-tokyo

[34] Site web: https://trends.nauticexpo.fr/project-327811.html

[35] Site web: https://www.afhypac.org/documentation/phototheque/applications-stationnaires/

[36] Site web: https://news-cdn.softpedia.com/images/news2/New-Filter-May-Develop-Smaller-Fuel-Cells-for-Laptops-and-Cellphones-2.jpg

[37] Site web: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.wired.com%-2F2009%2F02%2Fsony-shows

[38] Site web: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftechguru.fr-%2F2016%2F01%2F19%2Fpower-trekk-chargeur-eau%2F&psig

[39] Site web: https://a4,fr.com

[40] Site web: https://usinenouvelle.com

[41] achab nassira, ''Contribution à l'étude technico-économique et évaluation comportementale de système photovoltaique-électrolyseur-PAC et reformeur-PAC'', Mémoire de Magister, Univ mohamed boudiaf oran,01/07/2013.

[42] Walid Mabrouk, ‘‘Synthèse et caractérisation de nouvelles membranes protoniques. Applications en pile à combustible à membrane échangeuse de protons’’, Thèse de Doctorat, 10 Mars 2012.

[43] AFHYPAC, Mémento de l’Hydrogène, ‘‘La pile à combustible de type PEM1’’, FICHE 5.2.2.

[44] Site web: https://www.researchgate.net/figure/Description-dune-pile-de-type-PEMFC-et-de-son-point-triple_fig1_45229825

[45] Site web: http://iramis.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant-&id_ast=989

[46] 3M Company, 3M Membrane Electrode Assembly (MEA), http://www.3m.com/about3m/technologies/fuelcells/our_prod.

[47] Saïd Ait Hammou Taleb, ‘‘Couplage d'une pile à combustible avec des super capacités pour étudier les gains en termes de rendement et de durée de vie’’, Thèse de Doctorat, 31/01/2019.

[48] P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, ‘‘Test bench of a PEM fuel cell with low voltage static converter ’’, in Proc. The Fuel Cell Seminar, Austin (USA), 1-5 November 2004.

[49] F. Amrouche 1, B. Mahmah2 , M. Belhamel 2 et H. Benmoussa 3, ‘‘Modélisation d’une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale’’, Rev. Energ. Ren. Vol. 8.109 – 121,2005.

[50] SV-Puranik, A-Keyhani, F-Khorrami, ‘‘Neural-network modeling of proton exchange-membrane fuel cells. IEEE’’, Trans. Energy. Convers;25(2):474–83,2010.

[51] Kheirandish A, Motlagh F, Shafiabady N, Dahari M, Wahab AKA, ‘‘Dynamic fuzzy-cognitive network approach for modeling, and control of PEM fuel-cell for power electric bicycle system’’, Appl-Energy; 202, 2017.

[52] Abir Boucetta, ‘‘Modélisation 2D d’une pile à combustible type PEMFC pour une application embarquée’’, Thèse de Doctorat, 20 Janvier 2019.

[53] Laurent Antoni, ‘‘La pile à combustible Un convertisseur d’énergie d’avenir’’, Laboratoire d’innovations pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (CEA/LITEN), Grenoble, Janvier - Février 2 0 0 7.

[54] Mouhamed Bilal Danoune, Ahmed Djafour, and Abdelmoumen Gougui, ‘‘Accurate PEM fuel cell Parameters Identification Using Whale Optimization Algorithm’’, Chapter 27.

[55] Ammar Djerioui, ‘‘Etudes des stratégies et des structures de commande pour les systèmes d’Electro-générateurs à Pile à Combustible ’’, Thèse de Doctorat, 30/09/ 2018.

[56] Attia A. El-Fergany, ‘‘Extracting optimal parameters of PEM fuel cell using Salp Swarm Optimizer’’, Article, Electrical Power and Machines Department, Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig 44519, Egypt, 16 December 2017.

[57] Ahmed Fathy, Hegazy Rezk, ‘‘Multi-Verse Optimizer for Identifying the Optimal Parameters of PEMFC Model’’, Energy; doi: 10.1016/j. energy, 2017.11.14.

[58] Wenyin Gon,Zhihua Cai, ‘‘Parametre optimization of PEMFC model with improved multi-strategy adaptive differential evolution’’, Article, 25 july 2013.

[59] Zhe Sun a, Ning Wang a, Yunrui Bi b, Dipti Srinivasan c, ‘‘Parameter identification of PEMFC model based on hybrid adaptivedifferential evolution algorithm’’, Article, 27 July 2015.

[60] Z.W. Geem, J.-S. Noh, ‘‘Parameter estimation for a proton exchange-membrane fuel cell model using GRG technique. Fuel Cell’’,16(5):640-645, 2016.

[61] M.A. Taleb, O.B. Ethoux, E. Godoy, ‘‘Identification of a PEMFC fractional order model’’, Int. J. Hydrogen. Energy;42:1499–1509, 2017.

[62] A.M. Dhirde, N.V. Dale, H. Salehfar, M.D. Mann, T-H. Han, ‘‘Equivalent electric circuit modeling, and performance analysis of a PEM-Fuel cell stack using impedance spectroscopy’’, IEEE-Trans. Energy. Convers;25(3):778–786, 2010.

[63] KashifIshaque, Zainal Salam, Muhammad Amjad, and Saad Mekhilef, ‘‘An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation’’, IEEE Transaction on power electronics, VOL. 27, NO. 8, AUGUST 2012.

[64] KashifIshaque, Zainal Salam, ‘‘An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE)’’, Solar Energy 85.2349–2359. doi:10.1016/j.solener, 2011.06.25.

[65] Wang R, Li G, Ming M, Wu G, Wang L, ‘‘An efficient multi-objective model and algorithm for sizing a stand-alone hybrid renewable energy system’’, Energy, doi: 10.1016 j, energy, 2017.11.08.

[66] Mohamed Abd El Aziz, Ahmed A. Ewees, Aboul Ella Hassanien, ‘‘Whale Optimization Algorithm and Moth-Flame Optimization for multilevel thresholding image segmentation’’, Expert Systems With Applications 83.242–256, 2017.

[67] Hany M. Hasanien, ‘‘Performance improvement of photovoltaic power systems using an optimal control strategy based on whale optimization algorithm’’, Electric Power Systems Research 157.168–176,2018.

[68] El-GhazaliTalbi, ‘‘Metaheuristics from design to implementation’’, Wiley, Universite de Lille – CNRS – INRIA.

[69] Russell Eberhart, James Kennedy, ‘‘A New Optimizer Using Particle Swarm Theory’’, Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science,0-7803-2676-8/95$4.000 IEEE, 1995.

[70] Holland JH, ‘‘Genetic algorithms’’, Scientific American, 267, 66-72, 1992.

[71] DervisKaraboga, BahriyeBasturk, ‘‘A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm’’, J Glob Optim 39:459–471, DOI 10.1007/s10898-007-9149-x,2007.

[72] Maxime BOMBRUN, Abdoulaye SENE, ‘‘L’optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d’ordonnancement’’, Rapport d’ingénieur, Institut Supérieur d’Informatique de Modélisation et de leurs Applications, 2011.

[73] KashifIshaque and Zainal Salam, Member, IEEE, ‘‘A Deterministic Particle Swarm Optimization Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System under Partial Shading Condition’’, IEEE Transactions on industrial electronics, VOL. 60, NO. 8, August 2013.

[74] Young-Bin Shin, Eisuke Kita, ‘‘Solving two-dimensional packing problem using particle swarm optimization’’, Assisted Methods in Engineering and Science, 19: 241–255, 2012.

[75] Storn, R, Price, K, ‘‘Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces’’, Journal of Global Optimization:11 (4), 341–359, 1997.

[76] KlemenSredensek, Sebastijan SEME, ‘‘Parameter determination of a solar cell model using differential evolution algorithm’’, Przegladelektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 1/2019. doi:10.15199/48, Janvier 2019.

[77] Site web: http://heliocentris.com/prod_pic/in_FC50.html.

[78] Heliocentris Fuel Cell Trainer, ‘‘50 W Fuel Cell Trainer system’’, https://tech-labs.com/sites/default/files/140704_FCT_Broschuere_EN_WEB.pdf.

Annexes

Annexe1 : Propriétés physique et chimique d'hydrogène [77,78].

Propriétés physique et chimique d' H_2	Valeurs numériques
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg (50020 kJ/kg)
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	141860 kJ/kg
Densité gazeuse à 20.3 K	1.34 kg/m3
Densité liquide à 20.3 K	70.79 kg/m3
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/m. K
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante de gaz	4124.5 J/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (813 K)
Température de flamme dans l'air à 300 K	2318 K (2148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4 - 75 (5.3 - 15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13 - 65 (6.3 – 13.5)
Energie minimale d'inflammation (J)	20 (290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m3)	2.02 (7.03)
Surpression de détonation	14.7 (16.8)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm/s (0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 km/s (7 fois le G. Naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (1.8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air	29.53 % (9.48 %)

Annexe2 : Spécifications de la pile à combustible PEMFC 50 W [77,78].

La pile à combustible utilisée est **Fuel Cell Traine** de type **PEMFC,** les caractéristiques techniques sont données dans le tableau suivant :

La pile à combustible PEMFC	
Poids	19 kg
Puissance nominale	40 W
Puissance maximale	50 W
Tension à vide	9 V
Courant à la sortie nominale	8 A
La consommation d'hydrogène puissance nominale	580 sml/min
Pureté de l'hydrogène pour le fonctionnement	(99.99%)
Pression permise d'hydrogène	0.4 … 0.8 bar
La température ambiante permise lors du fonctionnement	+5 … +35°C

الملخص

في الآونة الأخيرة، حظيت مشكلة تطوير نموذج رياضي عالي الدقة لخلايا وقود تبادل البروتونات (PEMFCs) باهتمام كبير من قبل الباحثين بسبب تعقيد النموذج. يُنظر إلى طرق التحسين الفوقي على أنها أفضل أداة يمكن استخدامها لحل هذا المشكل. تطبق الدراسة الحالية تقنية تحسين تم تطويرها مؤخرًا ، وهي طريقة تحسين سرب الجسيمات (PSO) لغرض إنشاء نموذج عالي الجودة لخلية وقود PEM لها قدرة أعظمية 50 وات. الفكرة الرئيسية وراء هذا العمل هي تقليل مجموع الخطأ التربيعي بين عينات الجهد التجريبي و المقدر للحصول على تطابق جيد. لإثبات فعالية طريقة PSO المقترحة ، يتم أخذ خلية وقود Heliocentris-FC50 ذات القدرة الأعظمية 50 وات كنموذج لدراسة حالة. في النهاية ، كانت نتائج طريقة PSO تنافسية بدرجة كافية من حيث الدقة وسرعة التقارب. الخطأ الذي تم الحصول عليه بواسطة PSO منخفض بشكل ملحوظ (SSE = 0.3188V) مقارنة بـED (SSE = 0.5765V).

الكلمات المفتاحية: تحديد ; خلية وقود ذات غشاء التبادل البروتوني ؛ نموذج أمفليت ؛ طرق التحسين الفوقية ؛ خوارزمية تحسين سرب الجسيمات.

Résumé

Récemment, le problème du développement d'un modèle mathématique de haute précision pour les piles à combustible à échange de protons (PEMFC) a reçu beaucoup d'attention par les chercheurs dus à la complexité du modèle. Les méthodes d'optimisation méta-heuristique sont considérées comme un meilleur outil, qui pouvant être utilisés pour résoudre ce problème. La présente étude applique une technique d'optimisation récemment développée basée sur la population, appelée méthode d'optimisation par essaims des particules, dans le but d'établir un modèle de haute qualité pour une pile PEMFC de puissance maximale 50 W. L'idée principale derrière ce travail est de minimiser l'erreur quadratique entre les points de tension-courant expérimentaux et estimés pour obtenir un bon accordance. Pour démontrer l'efficacité de la méthode PSO proposée, une pile à combustible Heliocentris-FC50, qui a une puissance maximale de 50 W est traitée comme une étude de cas. Dans le même contexte, la performance du la méthode PSO est comparé avec un autre algorithme d'optimisation, appelée méthode d'évolution différentielle (ED). Finalement, les résultats de la méthode PSO ont été suffisamment compétitifs en termes de précision et de vitesse de convergence. L'erreur obtenue par PSO est remarquablement petite (SSE = 0.3188 V) par rapport à celle de ED (SSE = 0.5765 V).

Mots clés : Identification; Pile PEM; Modèle Amphlett; Méthodes d'optimisation méta-heuristique; PSO ;

Abstract

Recently, the problem of developing a high accuracy mathematical model for proton exchange fuel cells (PEMFCs) has received much attention by researchers due to the complexity of the model. Meta-heuristic optimization methods are seen as the best tool, which can be used to overcome this drawback. The present study applies a recent developed population based optimization technique, namely particle swarm optimization method for the purpose of establishing a high quality model for PEMFC with 50 W maximum power. The main idea behind this work is to minimize the sum square error between the experimental and estimated Voltage-Current points for obtaining a good match. To demonstrate the effectiveness of the proposed PSO method, a Heliocentris-FC50 fuel cell with a maximum power of 50 W is taken as a case study. In the same context, the performance of the PSO is compared with another challenging optimization algorithm, called the differential evolution (ED) method. Eventually, the results of the PSO method were enough competitive in terms of accuracy and convergence speed. The obtained error by PSO is remarkably low (SSE =0.3188V) compared to ED (SSE = 0.5765V).

Keywords: Identification; PEMFC; Amphlett model; Meta-heuristic optimization methods; PSO;